



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**REFUERZO A CORTANTE CON LAMINADOS FRP.
ESTUDIO DEL DESPRENDIMIENTO PREMATURO DEL
REFUERZO.**

Autor/a

GUILLEM VILLASEVIL MONTAVA

Tutor/a

EVA OLLER IBARS

Departament

ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ

Intensificació

ANÀLISI I PROJECTES D'ESTRUCTURES

Data

JULIOL 2016

Título: Refuerzo a cortante con laminados FRP. Estudio del desprendimiento prematuro del refuerzo.

Autor: Guillem Villasevil Montava

Tutor: Eva Oller Ibars

Tutor externo: Denise Ferreira

Palabras clave: FRP, desprendimiento prematuro, refuerzo a cortante, CONSHEAR, modelización numérica.

RESUMEN

Los compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP), se han introducido desde los años 90 en el campo del refuerzo estructural debido sobre todo a sus excelentes características mecánicas, su resistencia a la corrosión y a su ligereza. Hecho que se traduce en una facilidad y ahorro en el transporte, puesta en obra y aplicación.

Estos motivos han despertado un gran interés a nivel mundial y se han ido desarrollando nuevos métodos de cálculo y nuevas técnicas de aplicación. Sin embargo, estas investigaciones han ido dirigidas más al refuerzo a flexión, del cual hay un procedimiento bien definido y aceptado hasta la fecha. En el caso del refuerzo a cortante, aunque se ha demostrado que es un sistema eficaz para incrementar la capacidad última frente a esfuerzos cortantes, hay una necesidad de más estudios tanto experimentales como teóricos para avanzar en el entendimiento de los mecanismos resistentes.

Los mecanismos que explican el comportamiento a cortante de elementos de hormigón armado y pretensado son complejos, por lo que si además se les añade el refuerzo siguen siendo más complejos todavía. Existen dos problemáticas acerca del refuerzo a cortante con laminados de FRP. Por un lado, el desprendimiento prematuro del refuerzo hace que no se pueda aprovechar de manera eficiente las buenas características mecánicas del FRP y por otro lado, no hay un consenso internacional que determine la contribución del FRP a la resistencia a cortante, ni la posible interacción con la contribución del hormigón y su armadura pasiva transversal.

Después de elaborar un estado del conocimiento para conocer las propiedades y los modos de rotura del FRP, y a partir del criterio desarrollado por Oller (2005) para detectar el desprendimiento prematuro de laminados FRP en refuerzos a flexión, se ha implementado este criterio en el programa de análisis no lineal con deformación por cortante, CONSHEAR (Ferreira, 2013). De este modo, se detecta el desprendimiento del laminado, y una vez desprendido se prescinde de la contribución al cálculo de este elemento.

Una vez implementado este criterio, se modeliza una campaña experimental de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante mediante laminados llevada a cabo por Alzate (2012). Mediante esta modelización se han validado los resultados obtenidos con los resultados experimentales, de manera que se ha verificado el correcto funcionamiento del software en relación a la nueva implementación que considera el desprendimiento prematuro del FRP.

Title: Shear reinforcement of FRP. Study of debonding of FRP on shear reinforced concrete beams.

Author: Guillem Villasevil Montava

Tutor: Eva Oller Ibars

External Tutor: Denise Ferreira

Keywords: FRP, premature detachment, shear reinforcement, CONSHEAR, numerical modelling.

ABSTRACT

The use of fiber reinforced polymers (FRP) has been introduced since the 90s in the field of structural engineering mainly due to its excellent mechanical properties, its resistance against corrosion and its light weight. This fact translates into ease and savings on transportation, on-site installation and implementation.

These reasons have aroused great interest worldwide and it has been developed new methods of calculation and new application techniques. However, this research has been directed more to the flexural reinforcement, which is well-defined and far accepted. In the case of shear reinforcement, even though it has been shown to be an effective system for increasing the ultimate capacity against shearing forces, there is a need for both experimental and theoretical studies to advance the understanding of their resistance mechanisms.

The mechanisms that explain the shear behaviour of reinforced and prestressed concrete are complex, so if it is added more reinforcement remains even more complex. There are two problems about shear reinforcement with FRP laminates. On the one hand, premature peeling of the reinforcement makes it impossible to take advantage of the good mechanical properties of FRP and on the other hand, there is not an international consensus to determine the contribution of FRP to the shear strength, or its possible interaction with the contribution of concrete and transverse passive reinforcement.

After developing a state of knowledge to know the properties and failure modes of FRP, and from the criteria developed by Oller (2005) to detect premature detachment of laminated FRP in flexural reinforcement, it has been implemented this approach in the program which realises a nonlinear analysis with shear deformation, CONSHEAR (Ferreira, 2013). Then, the detachment of the laminate is detected, and once detached the analysis continues without the contribution of this element.

Once implemented this approach, an experimental campaign of reinforced concrete beams reinforced with laminates and conducted by Alzate (2012) is modelled. Through this modelling, the results have been validated with the experimental results obtained, so it is checked the correct functioning of the software in relation to the new implementation that considers premature detachment of the FRP.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutora de la UPC, Eva Oller Ibars, que me sugirió este tema para la tesina, guiándome durante su ejecución y proporcionando una buena información y el conocimiento esencial para realizarla.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a Denise Ferreira porque me ayudó a usar el programa CONSHEAR y me proporcionó información útil para resolver los problemas que me surgieron.

También me gustaría mencionar y agradecer a mis compañeros de mesa de Tec4 por el apoyo moral recibido y por comprender y valorar mi sentido del humor.

Finalmente, quiero agradecer a mis familiares por dar su apoyo incondicional durante todos mis estudios, no importa cómo fueron las cosas.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.	11
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	11
1.2.	OBJETIVOS.	13
1.3.	ESTRUCTURA.	13
2.	REFUERZO A CORTANTE DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.	15
2.1.	POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP)	15
2.1.1.	MATERIALES	16
2.1.1.1.	FIBRAS	16
2.1.1.2.	MATRIZ	17
2.1.2.	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	19
2.2.	COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE PIEZAS CON FRP.	20
2.2.1.	CONFIGURACIONES DE REFERENCIA.	20
2.2.2.	MODOS DE ROTURA.	22
3.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONSHEAR.	24
3.1.	RESUMEN CONSHEAR.	24
3.2.	IMPLEMENTACIÓN DEL CRITERIO DEBONDING.	31
3.2.1.	MODELO DE OLLER (2005).	32
3.2.2.	FORMULACIÓN PROPUESTA PARA REFUERZO A CORTANTE.	35
3.2.3.	IMPLEMENTACIÓN DEL CRITERIO DEBONDING EN EL CONSHEAR.	37
4.	VALIDACIÓN MODELO.	39
4.1.	DESCRIPCIÓN CAMPAÑA DE ALZATE (2012).	39
4.2.	RESULTADOS CAMPAÑA DE ALZATE.	42
4.3.	COMPARACIÓN RESULTADOS NUMÉRICOS-EXPERIMENTALES.	48
5.	CONCLUSIONES.	66
5.1.	CONCLUSIONES.	66
5.2.	FUTURAS INVESTIGACIONES.	68
6.	REFERENCIAS.	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Diagrama tensión-deformación para los principales tipos de fibras. (Carolín, 2003)....	20
Figura 2:	Diagrama de tensión-deformación de tracción uniaxial de diferentes tipos de FRP. (FIB Bulletin 14, 2001)	20
Figura 3:	Configuraciones de referencia de refuerzo de vigas con FRP. (Alzate, 2012).....	21
Figura 4:	Configuraciones de referencia en alzado de refuerzo de vigas con FRP. (Alzate, 2012).....	21
Figura 5:	Modos de rotura de una viga. (Rüsch, 1972)	22
Figura 6:	Modelo con interacción de M-N-V para elementos de HA reforzados con FRP. (Ferreira et al, 2013).....	25
Figura 7:	Modelo constitutivo para el hormigón: (a) fisura distribuida, (b) compresión, (c) tracción (Ferreira, 2013).....	25
Figura 8:	Modelo constitutivo para el refuerzo. (Ferreira, 2013)	26
Figura 9:	Modelo seccional híbrido N-M-V (1). (Ferreira et al., 2013)	26
Figura 10:	Modelo seccional híbrido N-M-V (2). (Ferreira et al., 2013)	27
Figura 11:	Estado de tensiones en las fibras que no resisten y resisten a cortante. (Ferreira, 2013).....	27
Figura 12:	Diagrama de flujo del programa CONSHEAR. (Ferreira, 2013)	29
Figura 13:	Esquema simplificado del modelo de Oller. (Oller, 2005).....	31
Figura 14:	Diagrama constitutivo del adhesivo. Diagrama simplificado del adhesivo. (Oller, 2005).....	32
Figura 15:	Solución del modelo de Oller. (Oller, 2005)	34
Figura 16:	Simplificación del modelo de Oller (Oller, 2005) para refuerzo a cortante de laminado FRP con configuración en U. (Rodríguez, 2014)	35
Figura 17:	Simplificación del modelo de Oller (Oller, 2005) para refuerzo a cortante de laminado FRP con configuración en S. (Rodríguez, 2014).....	36
Figura 18:	Esquema de refuerzo de las vigas de Alzate. (Alzate, 2012)	40
Figura 19:	Configuración de las bandas extensométricas. (Alzate, 2012).....	41
Figura 20:	Configuración de los ensayos. (Alzate, 2012).....	41
Figura 21:	Fallo en vigas con configuración en U a 90o con separación. (Alzate, 2012).....	43
Figura 22:	Fallo en vigas con configuración en U a 90o continua. (Alzate, 2012)	43
Figura 23:	Planos típicos de fisura. (Alzate, 2012)	44
Figura 24:	Cortante-flecha en centro de vano, vano largo ((a) y (b)) y corto ((c) y (d)), con 530 g/m ² ((a) y (c)) y 300 g/m ² de fibra ((b) y (d)). (Alzate, 2012)	44
Figura 25:	Deformaciones en los estribos para vano largo ((a) y (b)) y corto ((c) y (d)), con 530 g/m ² ((a) y (c)) y 300 g/m ² de fibra ((b) y (d)). (Alzate, 2012)	46
Figura 26:	Deformación máxima en el FRP para vigas con: (a) 530 g/m ² y (b) 300 g/m ² . (Alzate, 2012).....	46
Figura 27:	Comparación entre las deformaciones en los estribos y el CFRP en una misma viga. (Alzate, 2012)	47
Figura 28:	Elementos viga de la simulación numérica.	48
Figura 29:	Sección transversal de la malla de la simulación numérica.	48
Figura 30:	Elemento 7 y fibra 23 (Num peeling 7-23)	49
Figura 31:	Cortante-flecha en centro de vano, con refuerzo separado ((a) y (b)) y refuerzo continuo ((c) y (d)), y con 530 g/m ² ((a) y (c)) y 300 g/m ² de fibra ((b) y (d)).	51
Figura 32:	Numeración de los sensores para FRP con configuración separada. (Alzate, 2012)	52

Figura 33: Numeración de los sensores para FRP con configuración continua. (Alzate, 2012)	52
Figura 34: Deformaciones en los estribos para refuerzo separado y gramaje de 530 g/m ²	53
Figura 35: Deformaciones en los estribos para refuerzo separado y gramaje de 300 g/m ²	54
Figura 36: Deformaciones en los estribos para refuerzo continuo y gramaje de 530 g/m ²	55
Figura 37: Deformaciones en los estribos para refuerzo continuo y gramaje de 300 g/m ²	56
Figura 38: Deformaciones en FRP para refuerzo separado y gramaje de 530 g/m ²	58
Figura 39: Deformaciones en FRP para refuerzo separado y gramaje de 300 g/m ²	59
Figura 40: Deformaciones en FRP para refuerzo continuo y gramaje de 530 g/m ²	61
Figura 41: Deformaciones en FRP para refuerzo continuo y gramaje de 300 g/m ²	63
Figura 42: Tensiones en el FRP, con refuerzo separado ((a) y (b)) y refuerzo continuo ((c) y (d)), y con 530 g/m ² ((a) y (c)) y 300 g/m ² de fibra ((b) y (d)).	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Propiedades características de las fibras. (Feldman, 1989 – Kim, 1989)	17
Tabla 2:	Propiedades mecánicas de las matrices. (Alzate, 2012)	18
Tabla 3:	Propiedades mecánicas más comunes de los adhesivos curados, hormigón y acero. (Täljsten, 1994)	18
Tabla 4:	Programa de ensayos de las vigas modelizadas. (Alzate, 2012)	40
Tabla 5:	Resistencia máxima a cortante. (Alzate, 2012)	42
Tabla 6:	Cortantes de rotura experimentales y numéricos. (Alzate, 2012)	49

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los polímeros reforzados con fibras llamados FRP, llevan cerca de 50 años en uso comercial y se han empleado en ámbitos como la industria naval, aeronáutica o automovilística. Esto se debe a sus excelentes propiedades mecánicas y a que ya se han establecido sus técnicas de aplicación.

Los compuestos de FRP se han introducido en el campo del refuerzo estructural debido sobre todo a sus excelentes características mecánicas, su resistencia a la corrosión y a su ligereza. Hecho que se traduce en una facilidad y ahorro en el transporte, su puesta en obra y su aplicación.

El refuerzo, reparación y rehabilitación de infraestructuras existentes es un tema de actualidad. Su motivo suele ser principalmente por un cambio de uso, que conlleva un aumento del nivel de solicitaciones. También su llevan a cabo si se ha producido una pérdida de capacidad portante, ya sea por degradación de la estructura, por errores de proyecto o construcción, por falta de mantenimiento o bien por alguna situación accidental (terremotos, tsunamis,...).

Depende de la situación en la que nos encontramos, los refuerzos convencionales de hormigón o acero, resultan problemáticos.

El uso de recrecidos de hormigón con aporte de armadura, a pesar de ser efectivo desde el punto de vista de la ductilidad, la resistencia y la rigidez, acarreo algunos inconvenientes. Su proceso constructivo no suele ser sencillo, ocasionando la paralización del uso de la infraestructura por un periodo de tiempo importante. Además, conlleva al uso de mano de obra especializada, de métodos auxiliares (cimbras y encofrados) y de un estudio de las cargas adicionales de modo que se verifique que los elementos estructurales tienen suficiente capacidad portante para la pieza adicional.

Por otro lado, el uso de platabandas encoladas como refuerzo exterior es más sencillo a nivel constructivo, aunque sigue siendo necesario el uso de métodos auxiliares hasta que el refuerzo está adherido y la resina ha fraguado. También es más eficiente desde el punto mecánico y más económico, pero también acarrea problemas. El acero queda sujeto a la corrosión de forma que su sección y la adherencia de la resina pueden verse reducidas, y tiene cierta dificultad de manipulación debido al peso de las chapas de acero (suelen ser gruesas) y la limitación de la longitud de las placas para poder ser transportadas.

Para solucionar los inconvenientes de los refuerzos convencionales, en los años 90 se introdujo los FRP en el campo de refuerzo y reparación de estructuras. Desde entonces se ha producido una rápida aceptación del uso de estos materiales. Por sus características mecánicas, la aplicación de los FRP ha supuesto una mejora estructural sin afectar prácticamente a la rigidez ni al peso propio del elemento.

Por estos motivos se han desarrollado nuevos métodos de cálculo y nuevas técnicas de aplicación. Concretamente, estas investigaciones se han centrado más en el refuerzo a flexión y por eso ya hay un procedimiento bien definido y aceptado hasta la fecha. Pero en el caso del refuerzo a cortante, hay una necesidad de más estudios para avanzar en el entendimiento de los mecanismos resistentes y poder definir una formulación.

Si a los mecanismos que explican el comportamiento a cortante de elementos de hormigón armado y pretensado, que ya son complejos, les añadimos el refuerzo, son más complejos aún.

Debido a la complejidad de los mecanismos que explican el comportamiento a cortante de elementos de hormigón armado y pretensado, al añadirles el refuerzo, éstos son aún más complejos. Por ello, existen dos problemáticas acerca del refuerzo a cortante con laminados de FRP. El desprendimiento prematuro del laminado de FRP no nos deja aprovechar de manera eficiente sus buenas características mecánicas y, además, no existe un consenso que determine la contribución del FRP a la resistencia a cortante, ni su posible interacción con la contribución del hormigón y su armadura pasiva transversal.

Por este motivo, hay una necesidad de establecer una nueva filosofía que permita estudiar el comportamiento a cortante y hallar las expresiones que sean capaces de reproducir los distintos mecanismos resistentes que se desarrollan.

Todo esto comentado da origen al tema de este trabajo, orientado al estudio a cortante de elementos de hormigón armado (HA), reforzados externamente a cortante con FRP.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal se centra en el avance del conocimiento relativo al comportamiento a cortante de elementos de HA reforzados con FRP, para mejorar la comprensión de los mecanismos que contribuyen a la resistencia a cortante, profundizar en los modelos de predicción del comportamiento y en un futuro mejorar las formulaciones de cálculo propuestas hasta la fecha.

Para ello es preciso conocer las propiedades del FRP, así como sus campos de aplicación en las estructuras de hormigón y sus modos de rotura. Éstos serán descritos en el estado del conocimiento.

Seguidamente, a partir del criterio desarrollado por Oller (2005) para detectar el desprendimiento prematuro de laminados FRP a flexión, se trata de implementar este criterio en el programa de análisis no lineal que contempla la deformación por cortante, CONSHEAR (Ferreira, 2013), de forma que detecte su desprendimiento prematuro a cortante y realice una correcta predicción de la rotura.

Además, se modelizará una campaña experimental bien documentada (Alzate, 2012) y se validarán los resultados obtenidos con los resultados experimentales, de manera que se pueda verificar el correcto funcionamiento del software en relación a la nueva implementación que considera el desprendimiento prematuro del FRP.

1.3. ESTRUCTURA

Esta tesina se divide en 5 capítulos y 2 anejos.

Inicialmente se realiza una breve introducción a la problemática actual y que motivan el desarrollo de esta tesina. Además, se definen los objetivos que se pretenden alcanzar y la estructura del documento para llegar a estos objetivos.

En el capítulo 2 se presenta el material de trabajo (FRP), se hace una breve descripción de sus componentes y del material compuesto, se presentan sus características mecánicas y se analiza su comportamiento a cortante de elementos de hormigón armado con FRP.

En el capítulo 3 se hace una breve descripción del modelo CONSHEAR (Ferreira, 2013) y se presenta la aplicación de la formulación propuesta para el caso de refuerzo a cortante desarrollada por Oller (2005), que detecta el desprendimiento prematuro del FRP.

En el capítulo 4 se hace una descripción de la campaña experimental (Alzate, 2012) que, se modelizará con el modelo CONSHEAR. Posteriormente se comparan los resultados obtenidos con los experimentales para poder validar la implementación del criterio de desprendimiento prematuro del FRP en el software.

En el capítulo 5 se redactan las conclusiones del estudio realizado, y se proponen futuras líneas de investigación para complementarlo.

En el Anejo 1 se presenta la base de datos de la campaña de Alzate.

En el Anejo 2 se adjuntan los archivos de datos utilizados en la modelización numérica con el CONSHEAR.

2. REFUERZO A CORTANTE DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO CON LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

A pesar de no existir un consenso internacional que determine la contribución del FRP a la resistencia a cortante, sí que se han realizado tanto estudios experimentales como estudios teóricos acerca de sus mecanismos y su contribución a la resistencia a cortante.

2.1. POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP)

Los polímeros reforzados con fibras son un material formado por dos componentes (fibras y matriz), que juntos alcanzan unas prestaciones superiores a las propiedades de los materiales por separado. Las fibras son las responsables de aportar las propiedades resistentes del material compuesto, mientras que la matriz o resina se encarga de darle la configuración geométrica al material y a su vez de transmitir las tensiones a las fibras y protegerlas de posibles daños.

El conocimiento de los materiales que componen el FRP, forma la base para poder analizar y calcular sus propiedades. Para ello, se presenta una breve descripción de los componentes que forman el FRP.

2.1.1. MATERIALES

2.1.1.1. FIBRAS

Las fibras aportan la resistencia mecánica al compuesto. Las fibras son materiales con una estructura molecular en estado fibroso (no natural) por lo que los enlaces químicos que se crean son más fuertes y se aumenta tanto la resistencia del material como su rigidez. Además, gracias a su baja relación amplitud/longitud, la transferencia de las tensiones de la resina a las fibras es muy eficiente y se aprovecha al máximo las características del material.

Las características de la fibra dependen del material usado. Existe una gran diversidad de fibras y su elección varía según la aplicación del compuesto. Todas las fibras tienen un comportamiento a tracción elástico lineal hasta rotura.

Los tres tipos de fibra más comunes en ingeniería estructural son el vidrio, la aramida y el carbono. La fibra de vidrio se utiliza para la fabricación de perfiles y barras de refuerzo interno, la aramida se emplea en el refuerzo de estructuras de fábrica y la fibra de carbono para el refuerzo de elementos de hormigón armado o metálicos.

Las fibras de carbono (CFRP) poseen características muy similares a las del acero, pero con la ventaja que es más ligera. Su estructura cristalina es similar a la del grafito, basado en enlaces covalentes muy fuertes (en una estructura hexagonal) entre átomos situados en la misma capa y éstas unidas entre sí mediante débiles fuerzas de Van der Waals. Pero a diferencia del grafito, las capas de las fibras de carbono se disponen al azar apretadas por ellas mismas. Por este motivo, los enlaces son más resistentes y obteniendo unas buenas cualidades mecánicas.

Las fibras de vidrio (GFRP) poseen propiedades inferiores que las de las fibras de carbono, pero su precio más económico hace que también sean muy usadas. Los diferentes tipos de fibras de vidrio se diferencian entre sí en su resistencia al álcali y en su resistencia mecánica.

Las fibras de aramida (AFRP) tienen como ventaja su buen comportamiento ante cargas cíclicas y su alta dureza. Poseen una estructura molecular anisotrópica (mayor resistencia y módulo de elasticidad en el sentido longitudinal), por lo que proporciona buenas características mecánicas en ese sentido. Presentan un comportamiento no lineal cuando trabajan en compresión.

Las propiedades mecánicas de las diferentes fibras más utilizadas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1: Propiedades características de las fibras. (Feldman, 1989 – Kim, 1989)

Material	Módulo de elasticidad	Resistencia a tracción	Deformación última (a tracción)
	[GPa]	[MPa]	[%]
Carbono			
Alta resistencia	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Ultra alta resistencia	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Alto módulo	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Ultra alto módulo	500-700	2100-2400	0,2-0,4
Vidrio			
E	70	1900-3000	3,0-4,5
S	85-90	3500-4800	4,5-5,5
Aramida			
Bajo módulo	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Alto módulo	115-130	3500-4000	2,5-3,5

2.1.1.2. MATRIZ

La matriz o resina se encarga de darle la configuración geométrica al material compuesto para que se comporte como un sólido único y a su vez de transmitir las tensiones a las fibras y protegerlas de posibles daños. Por estos motivos, tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas del compuesto, como son el módulo transversal y la resistencia, y se considera muy importante en el estudio de la resistencia a cortante.

Hay que prestar cierta atención a su forma de aplicación, e intentar minimizar sus posibles problemas debidos a agentes ambientales externos (como por ejemplo la temperatura) o por desprendimiento prematuro del FRP. Y así, poder usarlo de forma eficiente.

Las resinas epoxi, poliéster y viniléster son las matrices más comúnmente utilizadas en los FRP. Se trata de polímeros termoestables con buena resistencia química. Su propiedad más característica es su respuesta a la temperatura, ya que no se funden al aplicarles calor. Sin embargo, pierden rigidez a partir de una determinada temperatura, hecho que nos limita a una cierta temperatura de trabajo.

De éstas tres, las resinas epoxi presentan unas mejores propiedades mecánicas y mayor durabilidad, por lo que su rendimiento es superior aunque sean de mayor coste. Las dos restantes, aún tener peores características, al ser más económicas, también son muy usadas.

Las características de las diferentes matrices más utilizadas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2: Propiedades mecánicas de las matrices. (Alzate, 2012)

Material	Módulo de elasticidad	Resistencia a tracción	Deformación última	Densidad
	[GPa]	[MPa]	[%]	[kg/m ³]
Poliéster	2.1 - 4.1	20 - 100	1.0 - 6.5	1000 - 1450
Viniléster	3.2	80 - 90	4.0 - 5.0	---
Epoxi	2.5 - 4.1	55 - 130	1.5 - 9.0	1100 - 1300

Por otro lado, las propiedades mecánicas de los adhesivos varían según el material al que se aplican. En la siguiente tabla podemos ver sus propiedades y éstas cuando se aplican en el hormigón o en el acero:

Tabla 3: Propiedades mecánicas más comunes de los adhesivos curados, hormigón y acero. (Täljsten, 1994)

Propiedad del adhesivo (a 20 °C)	Adhesivo epoxi curado	Hormigón	Acero
Densidad [Kg/m³]	1100 – 1700	2350	7800
Modulo elástico[GPa]	0.5 – 20	20 – 50	205
Modulo tangencial [GPa]	0.2 – 8	8 – 21	80
Coefficiente de Poisson	0.3 – 0.4	0.2	0.3
Resistencia a Tracción [MPa]	9 – 30	1 – 4	200 – 600
Resistencia a Cortante [MPa]	10 – 30	2 – 5	200 – 600
Resistencia a Compresión [MPa]	55 – 110	25 – 150	200 – 600
Deformación de Tracción en rotura [%]	0.5 – 5	0.015	25
Energía de Fractura (aprox.) [J/m²]	200 – 1000	100	10 ⁵ - 10 ⁶
Coefficiente de expansión Térmica [10⁻⁶/°C]	25 – 100	11 – 13	10 – 15
Absorción de agua: 7 días – 25oC [%w/w]	0.1 – 3	5	0
Temperatura de transición Vítrea [°C]	45 - 80	---	---

2.1.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Como ya se ha expuesto anteriormente, los laminados de FRP están formados por un material compuesto por fibras direccionadas integradas en una matriz que las protege y que distribuye la carga de uniformemente. El volumen de fibras que hay dentro del compuesto varía entre el 25% y el 70%. Las características mecánicas de los FRP dependen tanto de las propiedades individuales de los elementos que lo constituyen como de la proporción de cada uno en el compuesto.

Las principales características mecánicas del compuesto vienen reflejadas según las siguientes relaciones:

$$E_f = E_{ffb} \cdot V_{fb} + E_m \cdot V_m \quad (2.1)$$

$$f_f = f_{ffb} \cdot V_{fb} + f_m \cdot V_m \quad (2.2)$$

$$V_{fb} + V_m = 1 \quad (2.3)$$

Donde:

E_f : Modulo elástico del FRP en la dirección de las fibras.

E_{ffb} : Modulo elástico de las fibras.

E_m : Modulo elástico de la matriz (resinas).

V_{fb} : Volumen de las fibras.

V_m : Volumen de la matriz.

f_f : Resistencia a tracción del FRP en la dirección de las fibras.

f_{ffb} : Resistencia a tracción de las fibras.

f_m : Resistencia a tracción de la matriz (resinas).

En la Figura 1 podemos ver la comparación de la relación tensión-deformación entre los distintos laminados de FRP con el acero estructural y tendones de acero. A primera vista, podemos apreciar que los compuestos de FRP presentan mejores propiedades mecánicas que el acero, ya que su resistencia a tracción es del orden de cuatro veces superior. Por otro lado, podemos observar que los compuestos de FRP presentan comportamiento elástico-lineal hasta rotura sin deformaciones plásticas, no como el acero que colapsa produciendo una rotura dúctil. Por este motivo, se suele aplicar el FRP sobre hormigón armado con presencia de armadura pasiva, hecho que nos da una cierta ductilidad global.

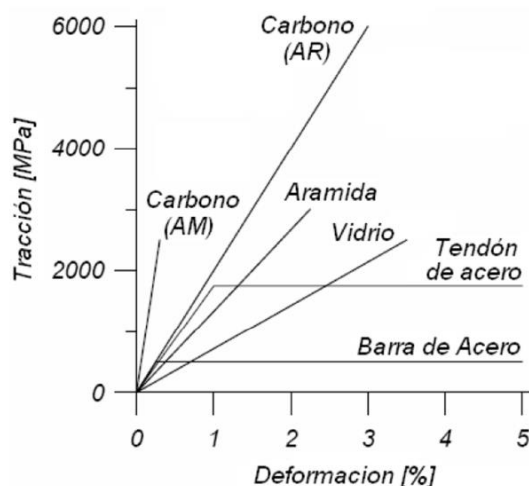


Figura 1: Diagrama tensión-deformación para los principales tipos de fibras. (Carolin, 2003)

Para poder comprender con mayor facilidad las diferencias en resistencia que se obtiene de los diferentes FRP, la Figura 2 compara sus curvas tensión-deformación con los del acero estructural. Es visible la gran resistencia que ofrece los materiales FRP a base de fibras de carbono (CFRP) en comparación con los otros materiales a base de fibras de aramida o de vidrio y con el acero estructural.

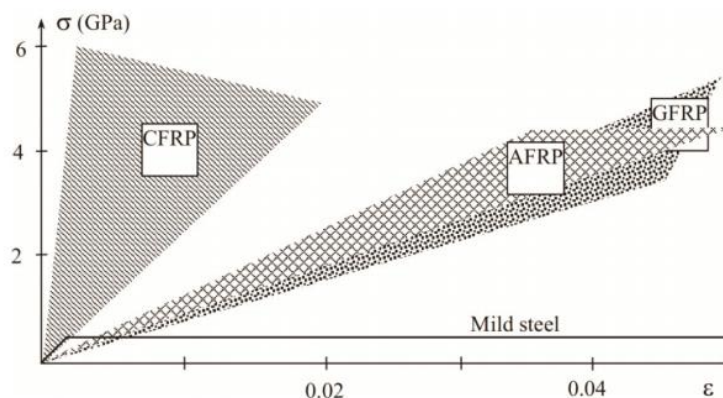


Figura 2: Diagrama de tensión-deformación de tracción uniaxial de diferentes tipos de FRP. (FIB Bulletin 14, 2001)

2.2. COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE PIEZAS CON FRP

Para conocer la capacidad resistente que aporta el FRP, primero hay que saber cómo estará dispuesto el FRP en la viga y los posibles modos de rotura.

2.2.1. CONFIGURACIONES DE REFERENCIA

La mayor parte de refuerzos se realiza con laminados in situ. Sus configuraciones de referencia más comunes son las siguientes:

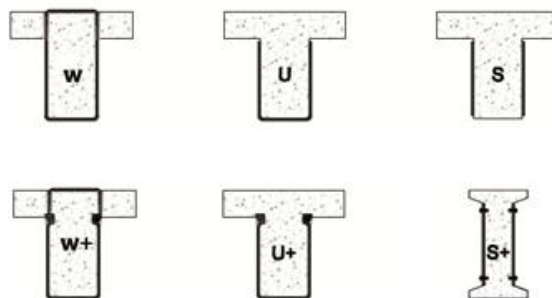


Figura 3: Configuraciones de referencia de refuerzo de vigas con FRP. (Alzate, 2012)

Donde:

- 1) W (Wrapped) : Envolvemos completamente la sección.
- 2) U (U-shaped) : Envolvemos toda la sección exceptuando la cara superior.
- 3) S (Sides) : Envolvemos las caras laterales.
- 4) + : Uso de anclajes

Además de disponerse de una forma determinada en la sección, las fibras se pueden disponer en diferentes alternativas. Las láminas de FRP se pueden disponer de forma continua a lo largo de toda la pieza o bien de forma discontinua.

Y, por otro lado, se pueden orientar las fibras con el fin de obtener una mayor eficiencia, ya que los FRP tienen mayor resistencia en la dirección de las fibras y éstas a su vez han de ser lo más paralelas a la dirección principal de tracción. Esta orientación, no resulta siempre posible o resulta compleja para poderse ejecutar y se suelen disponer de tal manera que forman 90 grados con la directriz de la pieza.

En la siguiente figura podemos ver las distintas disposiciones en alzado de los laminados de FRP:

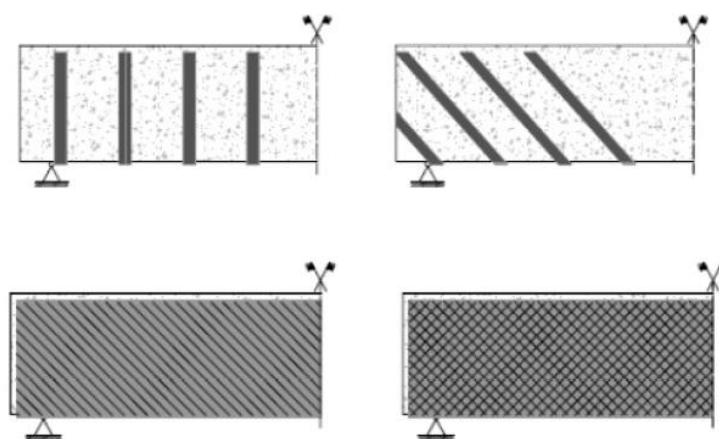


Figura 4: Configuraciones de referencia en alzado de refuerzo de vigas con FRP. (Alzate, 2012)

2.2.2. MODOS DE ROTURA

La causa del fallo a cortante es el resultado de un mecanismo complicado, dónde la fuerza resultante que actúa en una sección determinada y lo tiende a cortar, crea un estado de tensiones multiaxial provocando fisuras inclinadas y, finalmente, su fallo.

Por este motivo, el fallo a cortante de una viga se puede caracterizar con distintos modos de rotura:

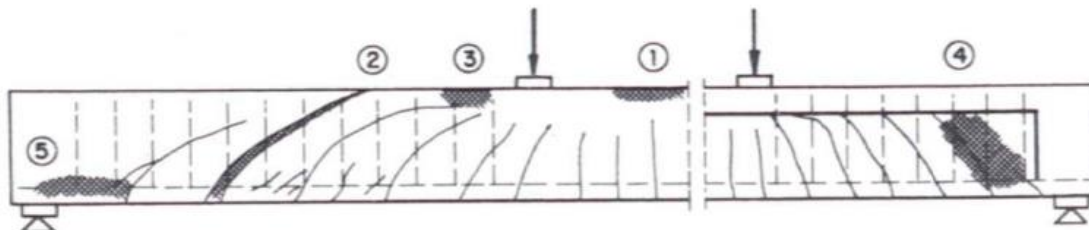


Figura 5: Modos de rotura de una viga. (Rüsch, 1972)

- 1) Rotura por flexión pura: Se produce al alcanzarse una deformación excesiva de la armadura de tracción y a la vez, por compresión en el hormigón (rotura dúctil). Si la cuantía de armadura es elevada, la rotura puede ser frágil.
- 2) Rotura por cortante en el alma: Las tensiones principales superan la resistencia a tracción del hormigón y provocan fisuras inclinadas. Se suele dar por falta de armadura transversal.
- 3) Rotura por flexión y cortante: El fallo se origina por fisuras verticales de flexión que se inclinan debido a la distorsión que introduce el cortante. La fisura progresa hasta que se produce aplastamiento de la cabeza de compresión.
- 4) Rotura por aplastamiento del alma: Se produce por aplastamiento de las bielas de compresión. Suele darse por un sobredimensionado a cortante y la armadura no alcanza el límite elástico antes de que supere la resistencia a compresión del hormigón.
- 5) Rotura por deslizamiento de las armaduras: Si las barras de la armadura longitudinal no están bien ancladas, puede producirse deslizamiento en las proximidades del apoyo, donde el cortante es máximo.

Por otro lado, cuando una viga de HA está reforzada externamente con FRP puede presentar los siguientes modos de rotura:

- Fallo por cortante con rotura del FRP: Se da al superar la deformación crítica del compuesto de FRP, que rompe y produce una fisura diagonal de cortante que lo lleva al fallo total.
- Fallo por cortante sin rotura del FRP: El hormigón falla sin que se rompa la fibra de FRP, ya que la capacidad de deformación es superior que la del hormigón.
- Fallo por delaminación: Se produce cuando no podemos transmitir esfuerzos rasantes entre el hormigón y el FRP. Este tipo de fallo se puede dar en diferentes situaciones: por desprendimiento entre el adhesivo y el FRP, por desprendimiento entre el adhesivo y el hormigón, por desgarramiento del recubrimiento del hormigón, o bien, por fallo en los anclajes mecánicos.

En definitiva, el modo de rotura del FRP depende esencialmente de la disposición escogida del elemento a reforzar, de la longitud de adherencia y de la resistencia de adherencia entre el FRP y el hormigón.

Por ejemplo, si analizamos vigas reforzadas completamente envueltas (en W) la sección falla por agotamiento de las capacidades mecánicas del FRP, mientras que las vigas reforzadas en las caras laterales (en S) o en U, la sección falla por desprendimiento prematuro del FRP.

A priori, nos interesa que la sección agote sus capacidades mecánicas, pero la disposición en W no siempre es posible en casos reales (falta de accesibilidad al elemento, consideraciones económicas, el tipo de carga a la que está sometido el elemento, corte o interrupción de armaduras existentes,...).

Con el fin de solucionar el fallo por desprendimiento prematuro, se han desarrollado algunas soluciones. Por ejemplo, podemos disponer laminados paralelos al eje longitudinal de la viga y los extremos de éstos anclados en la cabeza de compresión de la viga. Una variante sería anclar los laminados con laminados multidireccionales en ranuras en el hormigón de manera que se aumente la longitud de anclaje para una cuantía determinada de FRP. Y, por último, se puede usar anclajes mecánicos de los compuestos de FRP, realizados perforando la viga y usando pernos metálicos que atraviesen la viga y se anclen mediante arandelas metálicas en ambas caras de la viga.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONSHEAR

El uso de programas de elementos finitos 2D y 3D resulta complejo, no sólo por el coste computacional, sino por la dificultad para evaluar la gran cantidad de variables a introducir requeridas por el modelo y el posterior análisis de resultados. En cambio, los modelos 1D de elementos finitos discretos de barras con distribución no lineal son lo suficientemente simples pero a la vez precisos para realizar análisis no-lineales complejos, sin la necesidad de un elevado coste computacional y ofreciendo una interpretación de resultados más directa.

El modelo numérico 1D que se utilizará en esta tesina es el software CONSHEAR (Ferreira, 2013). Este modelo realiza un análisis no-lineal y evolutivo en el tiempo de estructuras de hormigón armado, pretensado y compuesto sometidas a esfuerzos normales y tangenciales.

3.1. BREVE DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONSHEAR

El modelo numérico CONSHEAR es una continuación del modelo de flexión pura CONS, para vigas armadas y/o pretensadas desarrollado previamente por el Departamento de Ingeniería de la Construcción (Marí, 2000).

El modelo CONS está basado en la teoría de vigas de Bernoulli y se trata de un modelo no lineal y evolutivo en el tiempo en la que la sección transversal se discretiza en fibras de hormigón y filamentos de acero. La armadura transversal se considera distribuida en las fibras de hormigón. A nivel de sección, se considera la hipótesis de las secciones planas de Navier-Bernoulli y cada fibra de hormigón y filamento de acero se encuentran en un estado de tensión-deformación unidimensional. Permite simular la respuesta de estructuras de hormigón armado, hormigón pretensado y compuesto (refuerzo con FRP). También permite considerar la

no linealidad material y geométrica, las deformaciones provocadas por fluencia, retracción, envejecimiento y gradientes de temperatura, así como también permite la simulación de la construcción por segmentos y el fortalecimiento de intervenciones anteriores por modificaciones que pueden darse durante la vida útil de la estructura. No obstante, CONS es un modelo de flexión pura y, por este motivo, no es adecuado simular el modelo si los efectos del cortante y las deformaciones tangenciales son notables.

CONSHEAR es una mejora del modelo CONS para poder analizar el efecto del cortante, de manera que se pueda aprovechar los beneficios del análisis secuencial y dependiente del tiempo para extender su aplicación a estructuras sometidas a cortante. El análisis no lineal y evolutivo en el tiempo nos permite observar la evolución de las tensiones en los elementos particularmente para la estructura a intervenir.

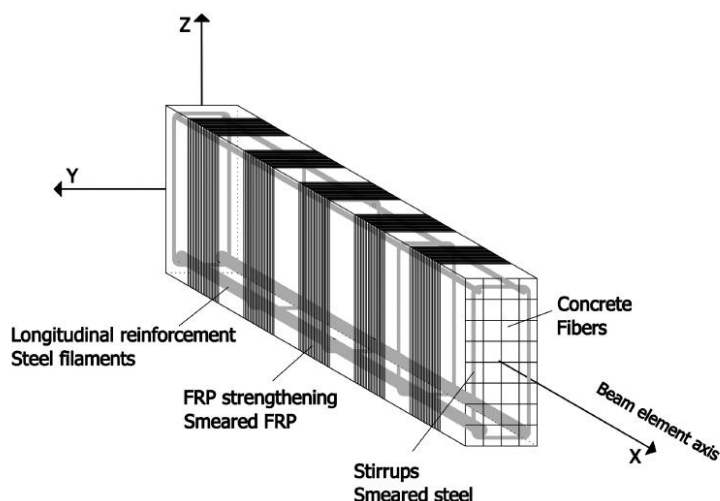


Figura 6: Modelo con interacción de M-N-V para elementos de HA reforzados con FRP. (Ferreira et al, 2013)

La ventaja de este programa está en que en el análisis no lineal que realiza, se considera la interacción entre esfuerzos axiales, flectores y cortantes. Para ello, se asume la teoría de vigas de Timoshenko a nivel del elemento y una formulación híbrida a nivel seccional, en las que las variables de entrada están formadas por variables cinemáticas y por variables de fuerza (las hipótesis de las secciones planas de Navier-Bernoulli se acoplan a la hipótesis de un flujo de tensiones tangenciales constantes actuando a lo largo del alma de la sección). A nivel constitutivo, para el hormigón se asume el modelo constitutivo multiaxial del hormigón mientras que, para la ecuación constitutiva del acero, se considera un estado uniaxial de deformaciones y tensiones, donde existe una fase elástica y una plástica.

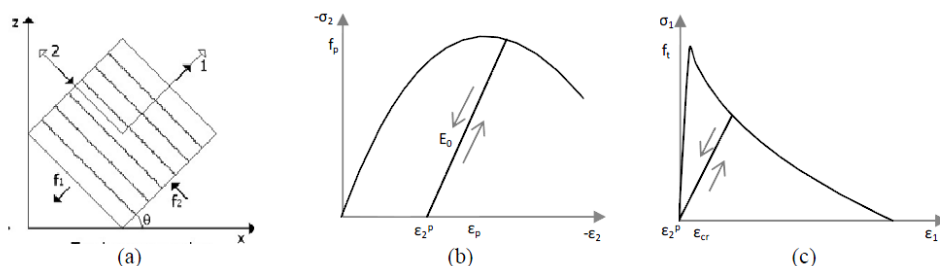


Figura 7: Modelo constitutivo para el hormigón: (a) fisura distribuida, (b) compresión, (c) tracción (Ferreira, 2013)

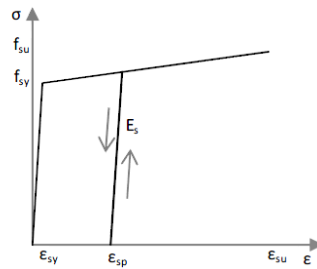


Figura 8: Modelo constitutivo para el refuerzo. (Ferreira, 2013)

A nivel seccional, se dividen las secciones de hormigón armado en fibras de hormigón envueltas por armadura transversal (acero o FRP), y en filamentos de armadura longitudinal. En consecuencia, es posible asignar diferentes materiales para diferentes fibras y filamentos en una sección transversal.

La armadura transversal y los refuerzos de es FRP se consideran envueltos en las fibras de hormigón. Es por ello que sus contribuciones a la resistencia y a la rigidez se realizan a través de una relación de magnitudes, y su estado de tensión-deformación se determina a través de leyes constitutivas independientes. Incluso si el refuerzo es discontinuo o está aplicado en la parte externa de la sección transversal, el refuerzo se considera envuelto en todas las fibras resistentes de cizallamiento.

Las suposiciones claves del modelo seccional híbrido (cinemática/fuerza), incluyendo la interacción entre resistencia axial-cortante- flexión (N-M-V) son: (i) la suposición cinemática de la teoría de las secciones planas de Navier-Bernoulli que permite determinar la deformación longitudinal de cada fibra en función de las deformaciones generalizadas de la sección combinadas con (ii) la suposición de una tensión a cortante constante a lo largo de la sección transversal.

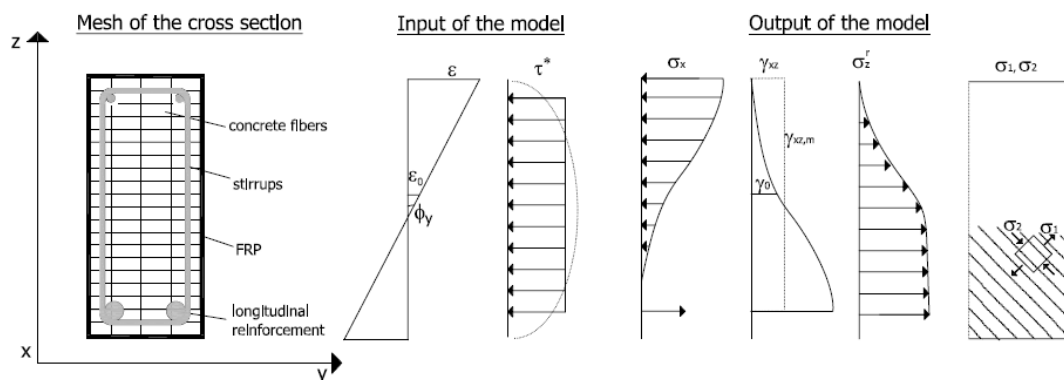


Figura 9: Modelo seccional híbrido N-M-V (1). (Ferreira et al., 2013)

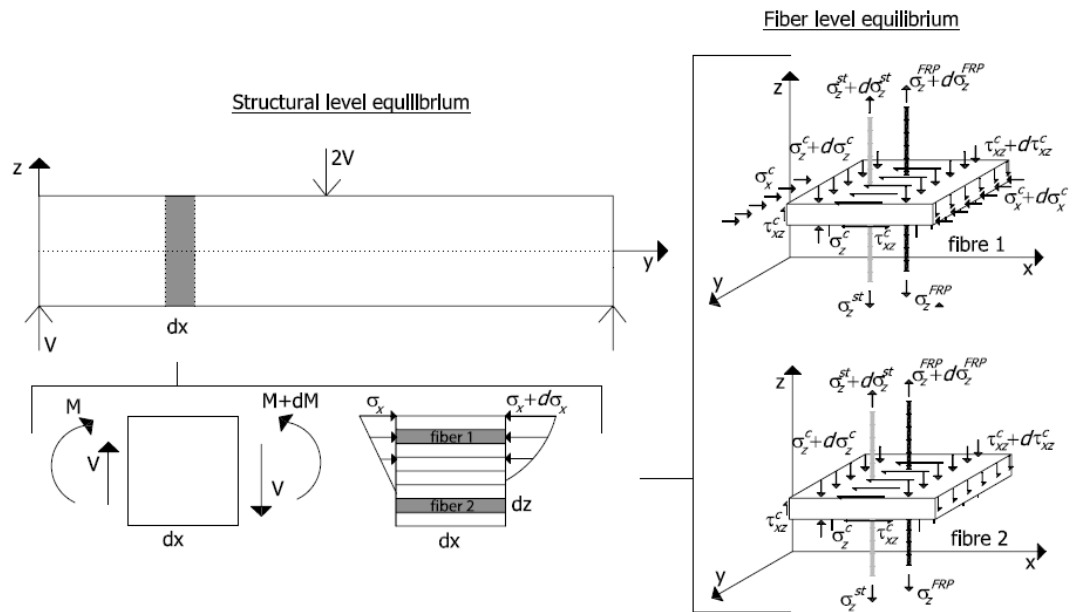


Figura 10: Modelo seccional híbrido N-M-V (2). (Ferreira et al., 2013)

La sección transversal se discretiza en dos tipos de fibras: (i) las fibras que no resisten a cortante se someten únicamente a esfuerzos axiales unidireccionales, y (ii) las fibras que resisten a cortante, se someten a un estado tensión-deformación multiaxial.

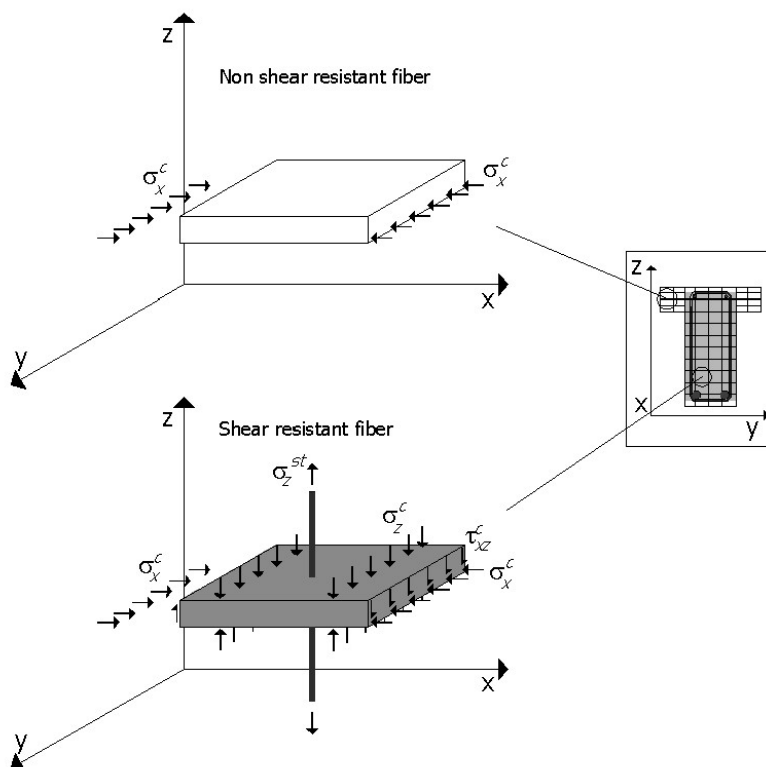


Figura 11: Estado de tensiones en las fibras que no resisten y resisten a cortante. (Ferreira, 2013)

El modelo no es capaz de proporcionar automáticamente el nivel de contribución de cada fibra a la resistencia a cortante como una función de la posición de la fibra. Esta división entre fibras que resisten y no a cortante se lleva a cabo por parte del usuario. Los criterios para la división de la sección transversal en estos dos tipos de fibras son:

- (i) para geometrías tradicionales de sección transversal, tales como la rectangular o en I, se considera que las fibras que pertenecen al alma son fibras 2D;
- (ii) en particular, para secciones transversales en I, un área efectiva de las alas se puede considerar que contribuye a resistir a cortante y se asigna como fibra 2D;
- (iii) para geometrías complejas, recomendaciones de normas de diseño como el EC2 (CEN 2004) se pueden utilizar como criterios simplificados.

Los filamentos de acero longitudinales solo se someten a deformaciones y tensiones axiales calculadas a través de la teoría de las secciones planas de Navier-Bernoulli.

La determinación del estado de las fibras (constituido por el hormigón y el refuerzo transversal) y los filamentos (constituido por el refuerzo longitudinal) se realiza por separado.

En la siguiente figura se puede ver de forma esquemática el diagrama de flujo implementado en el programa CONSHEAR.

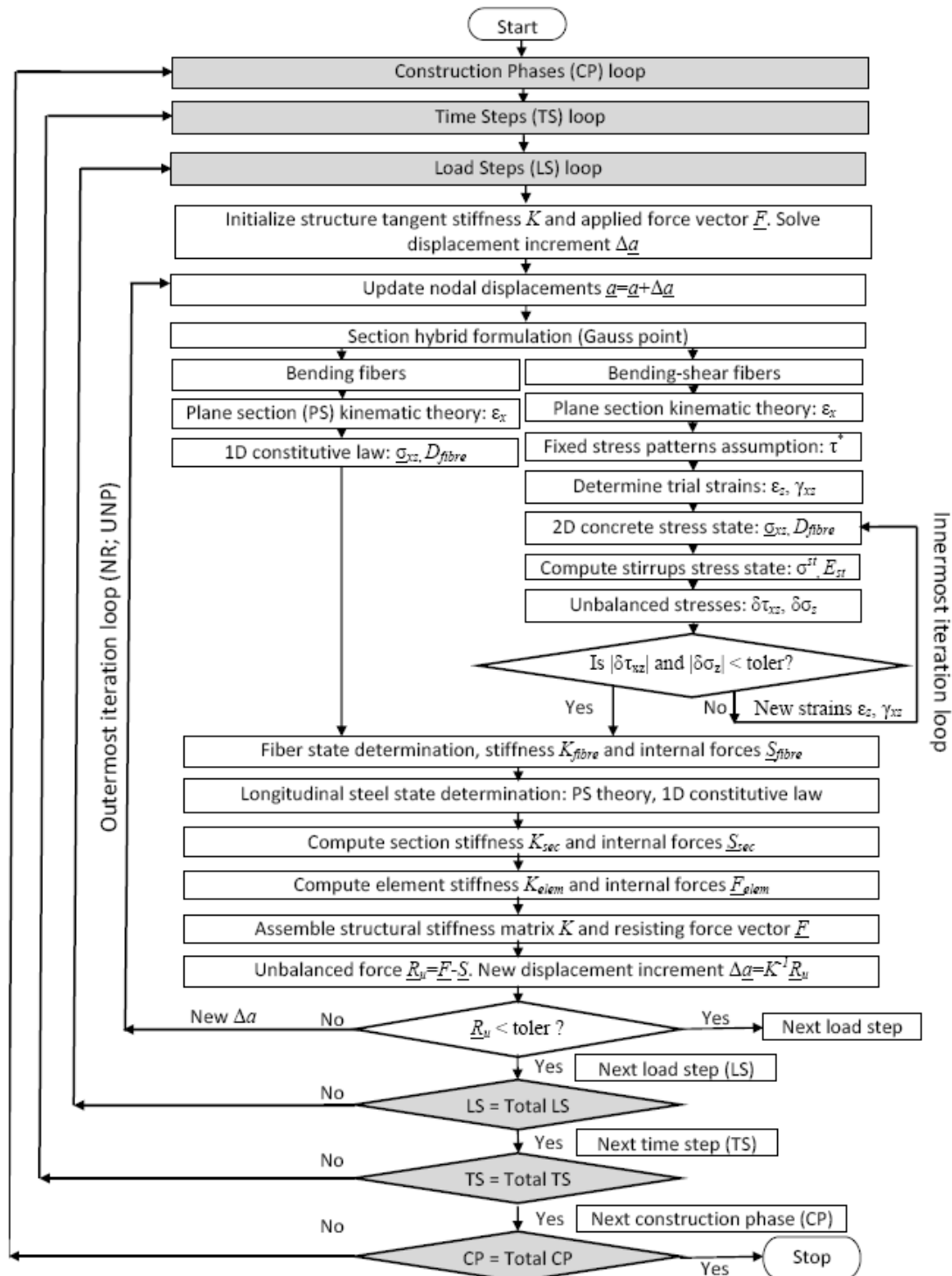


Figura 12: Diagrama de flujo del programa CONSHEAR. (Ferreira, 2013)

- Fases de construcción

El análisis por fases nos permite tener en cuenta posibles modificaciones que puedan ocurrir durante la vida útil de una estructura. Esto incluye la simulación de procedimientos de construcción segmentarios y posteriores cambios, incluyendo reparaciones y refuerzos. Concretamente, en cada fase constructiva, cualquier variación en la geometría transversal y longitudinal, en el diseño estructural, en las uniones entre elementos, en las condiciones de contorno, en las cargas aplicadas y en las propiedades de los materiales se pueden reproducir con el modelo numérico.

La deterioración y procesos de reparación también se pueden representar gracias a la posibilidad de considerar diferentes tipos de hormigón y acero, con diferentes tiempos de activación y supresión, para cada fibra de hormigón, refuerzo transversal y filamento de refuerzo longitudinal en una sección transversal.

Por lo tanto, las siguientes situaciones pueden ser simuladas:

- Sustitución de partes dañadas de hormigón con diferentes materiales;
- Ensanchamiento de la sección transversal de hormigón;
- Introducción de nuevas barras de refuerzo (longitudinal y transversal);
- Colocación o retirada de puntales temporales;
- Movimientos impuestos;
- Aplicación de pretensado exterior;
- Sellado de grietas, etc.

- Intervalos de tiempo

El tiempo que pasa de una fase constructiva a otra se divide en intervalos de tiempo. En cada intervalo de tiempo, las propiedades de los materiales se actualizan y los incrementos de las tensiones no mecánicas y su correspondiente vector de carga equivalente se calculan. El vector de carga también se actualiza.

El incremento de las tensiones no mecánicas que se produce durante el intervalo de tiempo está dado por la suma de las diferentes contribuciones (fluencia, retracción y gradientes térmicos). En cada instante, el vector de tensiones totales en una fibra viene dado por la suma de los vectores de tensiones mecánicas y no mecánicas.

El vector de fuerza nodal equivalente en el elemento debido a las tensiones no mecánicas se determina de forma incremental con la expresión de la MEF. Este vector de carga se ensambla en el vector de carga equivalente estructural y, en caso de que exista, se añade el vector de carga de relajación del acero de pretensado. A continuación, se aplica la carga en un instante de tiempo y se mantiene constante durante el resto de intervalo de tiempo.

- Pasos de carga

El cálculo numérico no lineal se realiza con un modelo de elementos finitos basado en el desplazamiento no lineal presentado y se lleva a cabo mediante un sistema de Newton-Raphson para resolver las ecuaciones globales de equilibrio. La respuesta de una estructura a lo largo de las diferentes etapas de daños (elástico, fisurado, plástico y límite último) son

reproducidas por el modelo. Además, los efectos no lineales del cortante y su interacción con las fuerzas normales se consideran durante todos los rangos de daños.

Debido a que el modelo propuesto para estructuras reforzadas se basa en una formulación 1D con un enfoque simplificado para tener en cuenta la interacción N-M-V, nos permite el análisis no lineal de elementos de hormigón armado reforzado con FRP de una manera simple pero precisa. El modelo es capaz de predecir los fallos a cortante, tomando en cuenta las contribuciones del hormigón, los estribos, y los refuerzos de FRP al mecanismo de la viga. También predice la carga que corresponde al inicio de carga para los refuerzos transversales, asociada con el inicio de fisuración diagonal y el final de la contribución del hormigón a los tirantes de tracción del mecanismo resistente de cortante. El desarrollo no lineal de las desviaciones con carga, tensiones y deformaciones en el hormigón y el refuerzo, la dirección principal de los flujos de tensiones, y los patrones de agrietamiento también se calculan con el modelo 1D.

En Marí (2005) podemos encontrar una descripción más detallada del modelo CONS, y en la tesis de Ferreira (2013) y en Ferreira et al. (2013) podemos encontrar información más detallada del modelo CONSHEAR y un análisis numérico para analizar la contribución del FRP de unas vigas de hormigón armado reforzadas con FRP

3.2. IMPLEMENTACIÓN DEL CRITERIO DEBONDING

En la tesis doctoral de Oller en 2005, se recoge un modelo que evalúa el desprendimiento prematuro del FRP en el refuerzo a flexión con laminados FRP. Este desprendimiento se puede iniciar en el extremo del laminado (similar a un caso de corte puro, como se puede apreciar en la figura 13) si es debido a una elevada concentración de tensiones en el punto de corte, o a lo largo del laminado si es producida por la aparición de fisuras de flexión y/o cortante.

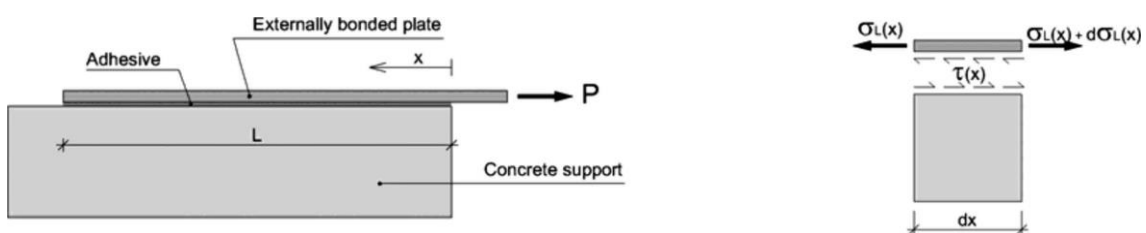


Figura 13: Esquema simplificado del modelo de Oller. (Oller, 2005)

Dado que el modelo, presentó un buen promedio y una baja dispersión al aplicarlo a una base de datos de ensayos a flexión reforzados con FRP en comparación con otros modelos existentes de adherencia (Oller et al, 2009), se ha propuesto una formulación que extiende el modelo de Oller para refuerzo a cortante y se pretende verificar esta formulación con unos resultados experimentales para su posible incorporación en una formulación teórica. A continuación, se resume brevemente el modelo teórico propuesto por Oller (2005).

3.2.1. MODELO DE OLLER (2005)

El modelo se basa en principios mecánicos con el fin de llegar a una formulación que nos indique la resistencia que puede tener un laminado de FRP antes de desprenderse. Para ello, se basa en las siguientes hipótesis:

- El adhesivo está expuesto solamente a tensiones tangenciales o rasantes.
- El grosor y la anchura de los adherentes y el adhesivo son constantes a lo largo de la zona reforzada.
- Los efectos de flexión en los adherentes no se consideran.
- La deformación axial de hormigón se desprecia ya que la rigidez axial del hormigón es mucho mayor que la rigidez axial laminado.
- Las tensiones de tracción se distribuyen uniformemente a lo largo de la sección transversal laminado.

Partiendo de estas hipótesis, y aplicando equilibrio y compatibilidad de deformaciones a un elemento diferencial, obtenemos la siguiente ecuación de gobierno que describe el comportamiento de una junta:

$$\frac{d^2 s}{dx^2}(x) - \frac{1}{E_L t_L} \cdot \tau(x) = 0 \quad (3.1)$$

Donde:

- s : Desplazamiento relativo entre hormigón y laminado.
 τ : Tensión tangencial entre hormigón y laminado.
 E_L : Modulo elástico del laminado.
 t_L : Espesor del laminado.

Para poder resolver la ecuación, hace falta relacionar el desplazamiento s con la tensión tangencial τ . Para ello, incorporamos la ley constitutiva del adhesivo, el cual se puede simplificar con la relación bilineal siguiente:

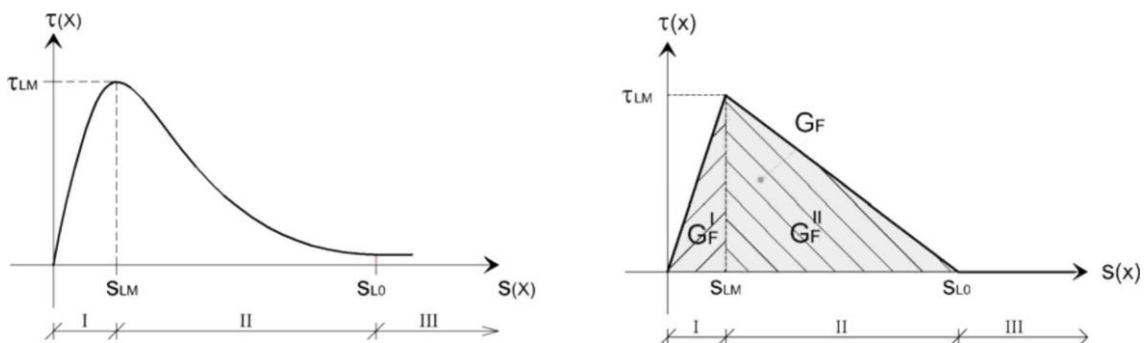


Figura 14: Diagrama constitutivo del adhesivo. Diagrama simplificado del adhesivo. (Oller, 2005)

Como podemos observar en el diagrama simplificado, se diferencian dos zonas, la zona elástica y la plástica. Los parámetros que definen esta relación constitutiva son dos. El primero es la tensión tangencial máxima que se puede transferir a través de la inter-fase, τ_{LM} , y se obtiene del criterio de rotura del hormigón, el material más débil de la inter-fase. El segundo, la energía de fractura G_F , es la energía necesaria capaz de separar el laminado del soporte y se calcula como el área bajo la curva $\tau - s$ definida por Brosens (2001).

$$\tau_{LM} = C_{\tau_{LM}} \cdot \left(\frac{1}{f_{ctm}} + \frac{1}{f_{cm}} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

$$G_F = C_{\tau_{LM}}^2 \cdot C_F \cdot f_{ctm} \quad (3.3)$$

$$C_{\tau_{LM}} = k_b = \sqrt{\frac{k_e}{1 + \frac{b_L(k_e - 1)}{t_{c,ref}}} \cdot \left(2 - \frac{b_L}{b} \right)} \quad (3.4)$$

Donde:

- f_{ctm} : Resistencia media a tracción del hormigón (MPa).
- f_{cm} : Resistencia media a compresión del hormigón (MPa).
- C_F : Constante de valor 0,40 para laminados de CFRP.
- k_e : Constante empírica calibrada por Brosens (2001). Con valor de 1,47.
- b_L : Ancho del laminado de FRP.
- b : Ancho de la sección de hormigón.
- $t_{c,ref}$: Espesor de hormigón afectado por el refuerzo externo. Se coge un valor de 2,5-3 veces el máximo tamaño del árido.

Aplicando las condiciones de contorno apropiadas e imponiendo la ley constitutiva del adhesivo para cada una de las zonas, las soluciones de las dos ecuaciones resultantes nos proporcionan las tensiones de tracción a lo largo del laminado. Para la zona elástica obtenemos una combinación lineal de funciones hiperbólicas, mientras que en la zona plástica obtenemos una combinación lineal de funciones trigonométricas. Y donde la máxima tensión admisible es τ_{LM} .

En la siguiente figura se muestra para el caso de corte puro y con un laminado suficientemente largo, la evolución de la distribución de tensiones tangenciales en la inter-fase a medida que aumenta el desplazamiento relativo s o la carga aplicada en el extremo del laminado.

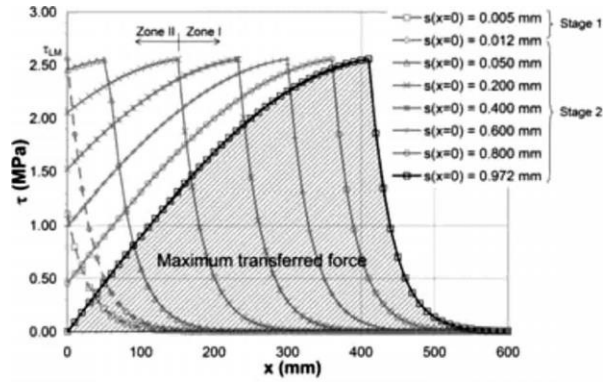


Figura 15: Solución del modelo de Oller. (Oller, 2005)

El proceso se basa en que inicialmente se obtiene una resistencia en el extremo donde se aplica la fuerza que va aumentando de forma elástica hasta τ_{LM} . Una vez llegamos a este valor, aparece una microfisura en la inter-fase, y al no poder aumentar más el valor de la tensión rasante, la zona afectada va desplazándose hacia zonas más alejadas del punto de aplicación de la fuerza. En las zonas microfisuradas, la tensión tangencial va disminuyendo a medida que aumentamos el desplazamiento relativo. La integral de la distribución de tensiones tangenciales es igual a la fuerza aplicada en el extremo del laminado.

Si el laminado es suficientemente largo, el valor de la fuerza máxima transmitida entre laminado y hormigón se obtiene cuando el deslizamiento es máximo en el extremo de aplicación de la carga y la tensión tangencial nula; que corresponde con el final de la rama descendente de la relación bond-slip (ver figura 14) si el laminado no es suficientemente largo ($L < L_{LIM}$).

El desprendimiento del laminado se produce cuando τ_{LM} alcanza el extremo del laminado donde no se aplica la carga y la longitud adherida es menor a L_{LIM} . Este hecho se produce antes de que el deslizamiento relativo sea máximo o que la tensión tangencial se anule en el extremo donde se aplica la carga.

Por lo tanto, la carga máxima transmitida por la inter-fase se obtiene con la siguiente ecuación:

$$P_{max,L} = P_0 \cdot \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L}{L_{LIM}}\right) & , L \leq L_{LIM} \\ 1 & , L > L_{LIM} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$P_0 = b_L \cdot \sqrt{2 \cdot G_F \cdot E_L \cdot t_L} \quad (3.6)$$

$$L_{LIM} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot G_F \cdot E_L \cdot t_L}}{\tau_{LM}} \quad (3.7)$$

Donde:

$P_{max,L}$: Fuerza máxima aplicable sin que se produzca desprendimiento (N).

P_0 : Resistencia media a tracción del hormigón (MPa).

- L : Longitud del laminado de FRP (mm).
 L_{LIM} : Longitud límite del FRP (mm).
 b_L : Ancho del laminado de FRP (mm).
 G_F : Energía de fractura (N/mm).
 E_L : Modulo elástico del laminado (MPa).
 t_L : Espesor del laminado (mm).
 τ_{LM} : Tensión tangencial máxima en el adhesivo (MPa).

El modelo de Oller (2009) es la extensión del caso de corte puro, a un elemento entre dos fisuras para simular el “intermediate crack Debonding” que ocurre con frecuencia en los elementos reforzados a flexión con FRP. Para el caso de refuerzo a cortante, se parte del modelo de corte puro y se aplica como se describe en el apartado 3.2.2.

3.2.2. APLICACIÓN DE LA FORMULACIÓN PROPUESTA PARA EL CASO DEL REFUERZO A CORTANTE

En este apartado se presenta cómo aplicar la formulación de corte puro del modelo de Oller (2005) para el caso de refuerzo a cortante considerando los efectos del desprendimiento prematuro del FRP.

Cuando el hormigón se fisura a cortante, la fisura inclinada crea dos zonas en la viga, que en un laminado de refuerzo a cortante discontinuo se puede simplificar en dos zonas separadas por una fisura horizontal. El cortante actuante se puede asimilar a dos fuerzas internas que intentan separar estas zonas aumentando el ancho de la fisura con el aumento de cortante.

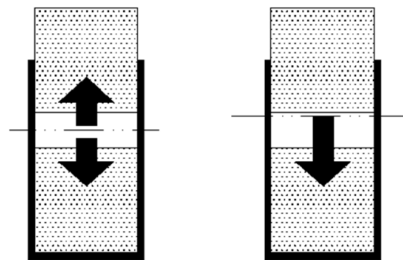


Figura 16: Simplificación del modelo de Oller (Oller, 2005) para refuerzo a cortante de laminado FRP con configuración en U. (Rodríguez, 2014)

Como podemos ver en la figura anterior, dos fuerzas que separan dos elementos de valores iguales F son equivalentes a una única fuerza que empuja un elemento estático de otro móvil de valor $2F$. De esta forma pasamos a un modelo equivalente al modelo simplificado utilizado por Oller. Teniendo en cuenta estas consideraciones, el cortante actuante es la mitad de la fuerza que representa el modelo de Oller (2005).

Además, si se trata de una configuración en U, encontramos dos puntos en los que se puede producir el laminado, una en cada cara del elemento reforzado, por lo que la fuerza resistente total será dos veces la calculada con el modelo de Oller (2005). De esta forma, concluimos que, si la configuración es en U, el modelo de Oller nos proporcionará el cortante máximo que puede resistir antes que se desprenda el laminado.

Por otro lado, si la configuración es en S, encontramos cuatro puntos en los que se puede desprender el laminado, dos por cada laminado. En este caso, la configuración es equivalente al modelo de Oller (2005).

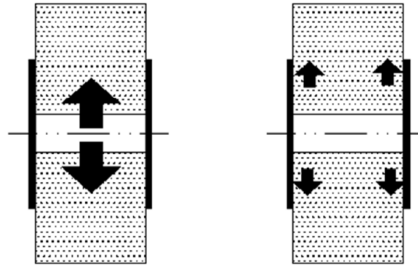


Figura 17: Simplificación del modelo de Oller (Oller, 2005) para refuerzo a cortante de laminado FRP con configuración en S. (Rodríguez, 2014)

Como cada laminado está dividido en dos partes por las que puede fallar, la fuerza que ha de resistir cada parte es la mitad del cortante actuante. Esta fuerza coincide con el caso de corte puro, pero con una longitud de adherencia menor. Por lo tanto, con estas simplificaciones, concluimos que la fuerza que nos proporciona el modelo de Oller (2005) dividida entre dos será el cortante máximo que podrá resistir antes de que se desprenda el laminado.

En la configuración en S, se puede producir que la longitud de anclaje sea inferior a la longitud límite, hecho que afectaría a la fuerza máxima que puede resistir el adhesivo. Ésta se vería afectada por un reductor (función seno) tal y como hemos observado en el apartado 3.2.1.

Por lo tanto, las hipótesis que hay que considerar, además de las descritas en el capítulo anterior, son los siguientes:

- Inicialmente, el hormigón soporta el cortante hasta que llegamos a una determinada carga. Entonces, éste se fisura y la resistencia que aporta el hormigón se sitúa en la cabeza comprimida (zona no fisurada). Esta resistencia es independiente a la del FRP, ya que la resistencia del FRP y la del acero se concentran en evitar que las fisuras ya creadas aumenten. Esta consideración nos lleva a que la resistencia del FRP no es independiente a la del acero, concretamente cuando ha plastificado ya que los incrementos de tracción que se generan al aumentar la carga los soporta el FRP.
- El FRP tiene una resistencia, por lo general, superior al límite elástico del acero. Cuando el acero plastifica, el FRP es el que evita que las deformaciones nos aumenten las fisuras creadas en el hormigón. Por este motivo, la resistencia del FRP no es independiente del acero

3.2.3. IMPLEMENTACIÓN DEL CRITERIO DEBONDING EN EL CONSHEAR

Como ya se ha mencionado anteriormente, las configuraciones en U i en S suelen fallar debido al desprendimiento del laminado después de la formación de una fisura crítica de cortante. Por lo tanto, un criterio de desprendimiento del laminado tiene que considerarse en el análisis numérico con el fin de dar cuenta de este tipo de fallo, que es esencial para una correcta simulación de estas configuraciones de FRP. En el refuerzo a flexión, el fallo por desprendimiento prematuro puede iniciarse ya sea en fisuras intermedias debido a esfuerzos de cortante, o cerca del final del laminado. Cuando se produce el desprendimiento, el laminado no contribuye más a resistir la sección y, generalmente, nos lleva al fallo estructural, ya que no se consigue alcanzar el equilibrio entre las fuerzas aplicadas, las reacciones y las fuerzas internas. Para el refuerzo a cortante, el desprendimiento prematuro se inicia una vez que las fisuras críticas de cortante se abren. Entonces, los laminados se desprenden si la longitud del laminado de FRP entre la fisura a cortante y el final no es suficiente para anclar o transferir la fuerza de tracción que actúa sobre el FRP. En el caso en S, el desprendimiento se puede observar en ambos lados de la fisura crítica. En el caso en U, el desprendimiento se produce en el lado superior de la fisura.

La aproximación del fallo por desprendimiento prematuro implementado en el modelo actual es el propuesto por Oller et al. (2009). Este modelo fue desarrollado para el refuerzo a flexión. Para predecir el desprendimiento prematuro para el refuerzo a cortante de FRP, se puede aplicar la misma formulación que la usada cerca del final del laminado.

Una vez vistas las hipótesis que hay que considerar para tener en cuenta el desprendimiento prematuro del laminado, hemos de implementarlas en el programa CONSHEAR (Ferreira, 2013). Para ello, introducimos dos parámetros de información general a partir de los cuáles podemos calcular el resto de información necesaria para realizar el análisis. Los dos parámetros son los siguientes:

- τ_{LM} (τ_{LM}): La tensión tangencial máxima que se transfiere a través de la inter-fase.
- G_F (G_F): La energía de fractura.

Estos parámetros los sacamos de la formulación propuesta por Oller (2005), y que hemos descrito en el apartado 3.2.1. Las ecuaciones usadas son las ecuaciones (3.2) y (3.3):

$$\tau_{LM} = C_{\tau_{LM}} \cdot \left(\frac{1}{f_{ctm}} + \frac{1}{f_{cm}} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

$$G_F = C_{\tau_{LM}}^2 \cdot C_F \cdot f_{ctm} \quad (3.3)$$

Y que dependen de la ecuación (3.4) y de las relaciones siguientes:

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad (3.8)$$

$$C_F = 0,4 \text{ (constante para laminados de CFRP)} \quad (3.9)$$

Una vez definidos estos dos parámetros y con los valores del módulo elástico, el espesor del FRP y la longitud entre la fisura y el final del laminado que nos da el CONSHEAR, podemos encontrar los valores de la carga máxima transmitida por la inter-fase (3.5) y la longitud límite del FRP (3.7) definidas en el capítulo anterior:

$$P_{max,L} = P_0 \cdot \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L}{L_{LIM}}\right) , & L \leq L_{LIM} \\ 1 , & L > L_{LIM} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$P_0 = b_L \cdot \sqrt{2 \cdot G_F \cdot E_L \cdot t_L} \quad (3.6)$$

$$L_{LIM} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot G_F \cdot E_L \cdot t_L}}{\tau_{LM}} \quad (3.7)$$

Finalmente, falta comprobar si existe desprendimiento prematuro del FRP. Para ello, se considera que la fibra crítica de cortante se encuentra a $3/4h$, siendo su tensión crítica σ_z^{FRP} ($z=3/4h$). Este criterio es consecuencia de una de la hipótesis básica del modelo, dando mayores tensiones de cortante y mayores tensiones verticales en las zonas más agrietadas. A medida que la tensión vertical en la frontera es nula, el gradiente es igual a la tensión de tracción en la fibra crítica. Entonces, la tensión crítica en el FRP σ_z^{FRP} ($z=3/4h$) se compara con la tensión vertical máxima posible para ser transmitida por el mecanismo de unión, $S_{max,peel}$, que se corresponde con la carga máxima transmitida por la inter-fase.

$$S_{max,peel} = \frac{P_{max,Lb}}{b_L t_L} \quad (3.10)$$

Cuando las tensiones σ_z^{FRP} del laminado de FRP en la fibra crítica alcanzan la tensión máxima permitida que puede ser transferida por el mecanismo de unión, el área de FRP de dicha sección transversal pasa a ser cero ($A_{FRP}=0$), y se continúa el análisis aplicándose una redistribución de las fuerzas en estribos de acero y FRP restantes de otras secciones transversales.

4. VALIDACIÓN MODELO

El principal objetivo de este apartado, es analizar la calidad del ajuste del modelo comparando los resultados de la campaña experimental realizada por Alzate (2012) con los resultados obtenidos mediante el modelo numérico a partir de los datos experimentales dados. Una validación del modelo permitiría poderlo utilizar para obtener información y entender el comportamiento de las vigas, en los casos en los que se disponga de datos experimentales.

Una versión anterior del modelo, que no tenía en cuenta el mecanismo de fallo de la unión del FRP, fue validada anteriormente para la configuración completamente envuelta.

4.1. DESCRIPCIÓN CAMPAÑA DE ALZATE (2012)

En este apartado se presenta el programa experimental desarrollado en la tesis doctoral de Alzate (2012), en el que se han modelizado una serie de vigas con unas configuraciones y disposiciones determinadas. En los ensayos realizados en esta campaña, se midieron las deformaciones en los cercos de acero y en las bandas de FRP con el fin de aportar conocimientos debido a los escasos trabajos experimentales relativos al análisis del efecto del cortante sobre el FRP.

En el programa experimental se realizaron el diseño, fabricación y ensayo de dieciséis vigas de HA con baja cuantía de acero transversal y suficiente cuantía longitudinal, con el fin de que el fallo se produjera por cortante.

En la última validación del modelo CONSHEAR, se usaron las vigas con la configuración completamente envuelta. Para este estudio experimental y su posterior validación, se han usado las vigas con configuración en U, y en las que solo hay un extremo en el que se puede

producir el desprendimiento prematuro del FRP. Las vigas con configuración en U son nueve de las dieciséis vigas totales de las que tenemos información. Estas nueve vigas con configuración en U tienen las siguientes particularidades:

- Dos tipos de tejido unidireccional, de 530 y 300 g/m², dispuesto en bandas de 300 mm de ancho.
- Orientación de 90° respecto al eje de la viga.
- Dos disposiciones de las bandas del tejido: pegado continuo o espaciadas 200 mm (medido perpendicularmente a la dirección del tejido).

En la tabla 4, podemos observar el resumen del programa de ensayo de las series estudiadas para la validación del programa CONSHEAR, teniendo en cuenta el criterio “Debonding”. La nomenclatura es la siguiente: La letra inicial indica la configuración del refuerzo (en nuestro caso estudiamos las vigas en U, donde se envuelve la parte inferior y los laterales de la viga. Los 2 dígitos siguientes indican el ángulo de orientación de las fibras de FRP respecto al eje longitudinal (90°). El siguiente carácter indica si el refuerzo es espaciado (S, con un espaciamiento de 200 mm) o continuo (C). El número siguiente indica el peso por metro cuadrado de FRP (3 para 300 g/m² o 5 para 530 g/m²). Como para cada configuración se hacen 2 o 3 ensayos, se identifican con una letra diferente (a, b y c). Finalmente, aparecerá una letra entre paréntesis (una L, ya que analizamos los vanos largos).

Tabla 4: Programa de ensayos de las vigas modelizadas. (Alzate, 2012)

Series	Configuración	Orientación de las fibras	Cantidad de fibra	Separación libre	Número de vigas
		[°]	[g/m ²]	[mm]	
U90C5	U	90	530	0	2
U90S5	U	90	300	200	2
U90C3	U	90	530	0	2
U90S3	U	90	300	200	3

Las vigas modelizadas tienen un ancho de 250 mm, un canto de 420 mm y una longitud total de 4500 mm. Las vigas se ensayaron en dos ocasiones, en el primer ensayo la luz fue de 4300 mm y en el segundo la luz fue de 3040 mm. La carga se aplicó a una distancia de 1260 mm del apoyo. La armadura pasiva longitudinal, con un límite elástico f_y de 500 MPa, es igual para todas las vigas y consta en su parte inferior de 6 ϕ 20, en dos capas una de 4 barras y otra de 2, y en su parte superior de 2 ϕ 10. La armadura transversal pasiva de acero, con un límite elástico f_y de 500 MPa, está formada por cercos de 8 mm de diámetro con una separación de 380 mm. En la figura 18 se puede apreciar la sección y la disposición de la armadura pasiva.

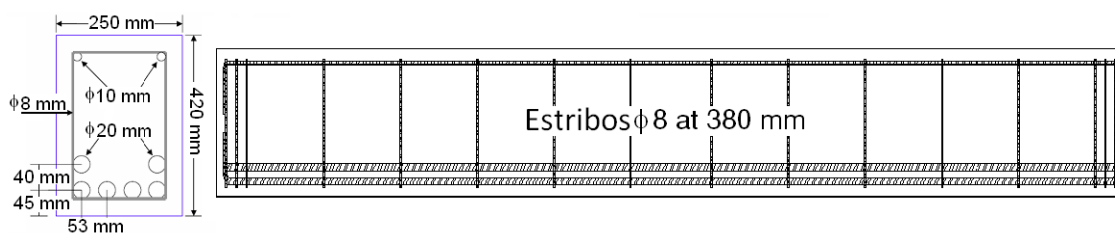


Figura 18: Esquema de refuerzo de las vigas de Alzate. (Alzate, 2012)

Una vez las vigas han pasado su etapa de 28 días de curado, se aplica el refuerzo externo, el FRP. Éste está compuesto por tejido unidireccional de fibra de carbono adherido a la viga con resina epoxi usando un sistema manual de impregnación, moldeo y posterior curado durante 7 días. El refuerzo transversal de FRP consiste en tejidos continuos de 300 mm de ancho con gramajes, de 300 g/m^2 (vigas S3) y 530 g/m^2 (vigas S5). El FRP se dispone en forma de U, con un ancho de 250 mm y una altura de 420 mm, y con distintas geometrías, de forma continua (C) o con una separación libre de 200 mm (S).

Finalmente, para estudiar el comportamiento del refuerzo externo e interno y su interacción se dispusieron distintas bandas extensométricas en ambos refuerzos. Estas bandas extensométricas se colocaron en el acero y en el FRP de tal forma que las bandas estuvieran en posiciones coincidentes o cercanas. En la Figura 19 se muestra la disposición de las bandas extensométricas sobre la viga, la letra S indica que está dispuesta en el acero y la letra F, en el FRP. Esta disposición se repite en ambas caras y en ambos extremos. El desplazamiento vertical en el centro de la viga se mide con un captador de desplazamientos (LVDT).

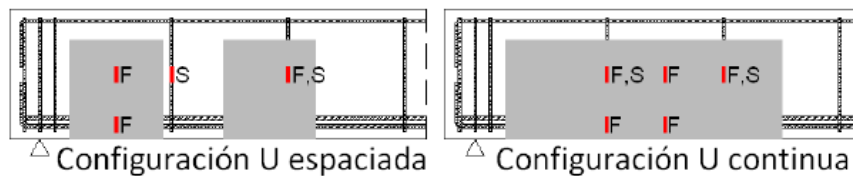


Figura 19: Configuración de las bandas extensométricas. (Alzate, 2012)

Transcurridos los 7 días de curado, se realizan los ensayos. Con el fin de obtener un mayor rendimiento, se realizan dos ensayos por viga. En la Figura 20 podemos observar los dos ensayos que se realizan:

- Viga Larga: Se realiza sobre el total de la viga con una luz de 4300 mm, en la cual se aplica una sola carga puntual a 1260 mm (3 veces el canto).
- Viga Corta: Una vez la viga falla por uno de sus extremos, se limita la luz moviendo el apoyo del lado ensayado al punto donde estaba situada la carga, resultando en un vano de 3040 mm y situando el punto de carga en el lado opuesto a la misma distancia, 1260 mm.

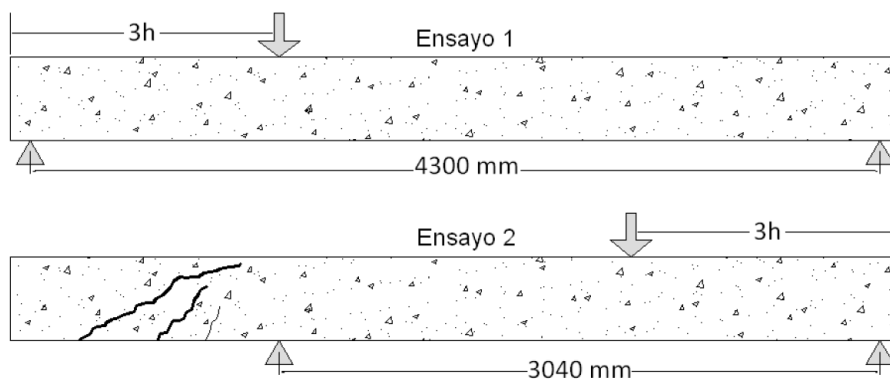


Figura 20: Configuración de los ensayos. (Alzate, 2012)

La viga está simplemente apoyada en dos soportes colocados a 100 mm del extremo, sobre un rodillo y un palastro de acero de 80 mm de ancho. La carga se aplica con un gato hidráulico de 500 kN de capacidad y se distribuye en el ancho de la viga mediante un perfil metálico colocado sobre una base de escayola para asegurar una distribución uniforme de la carga. Los ensayos se realizaron en control por carga a una velocidad de 0.30 kN/s de forma continua hasta la rotura. El desplazamiento en el centro de vano y las deformaciones en las bandas extensométricas se registraron de forma continua mediante ordenador a través un datalogger con una frecuencia de muestreo de 1 Hz.

4.2. RESULTADOS CAMPAÑA DE ALZATE

En este apartado se presenta los resultados experimentales de la tesis doctoral de Alzate (2012).

4.2.1. CORTANTE DE ROTURA

En la tabla 5, se resumen la resistencia a compresión del hormigón, el cortante de rotura para cada viga, su valor medio para vigas del mismo tipo y la relación entre el cortante medio y el de la viga de control.

Tabla 5: Cortante último experimental. (Alzate, 2012)

Viga	f_{cm}	Cortante de rotura		Valor medio	Promedio control
		Luz larga	Luz corta		
	[MPa]	[kN]	[kN]	[kN]	
Control	36.95	148.99	158.24	153.62	1.00
U90S5-a (V2)	36.95	246.73	218.14	231.60	1.51
U90S5-b (V11)	28.01	235.92	225.62		
U90C5-a (V3)	24.47	217.04	194.49	219.18	1.43
U90C5-b (V5)	22.64	243.27	221.93		
U45S5	30.67	206.22	221.40	213.81	1.39
W90S5	24.47	276.21	374.28	325.25	2.12
U90S3-a (V8)	20.50	207.43	195.64	206.94	1.35
U90S3-b (V9)	22.58	203.61	223.86		
U90S3-c (V12)	28.01	231.82	179.25		
U90C3-a (V13)	30.20	208.84	215.43	202.20	1.32
U90C3-b (V14)	30.20	201.77	203.95		
U45S3-a	20.50	189.61	198.80	201.77	1.31
U45S3-b	30.67	211.03	207.64		
W90S3-a	22.58	311.42	321.35	294.10	1.91
W90S3-b	22.64	284.34	276.62		
Promedio		226.52	227.29		

Como podemos observar, los cortantes de rotura muestran una amplia dispersión, distribuida aleatoriamente. Sin embargo, el valor medio obtenido de todos los ensayos para vano corto o largo son prácticamente idénticos, por lo que pueden considerarse equivalentes.

4.2.2. MODOS DE FALLO Y PERFILES DE FISURACIÓN

Los ensayos sobre las vigas con refuerzo en U, con separación y un ángulo de 90° respecto al eje longitudinal de la viga, el fallo ocurre por cortante con desprendimiento del FRP con arrastre del hormigón superficial. El ángulo de la fisura principal a cortante se encuentra alrededor de los 33° .

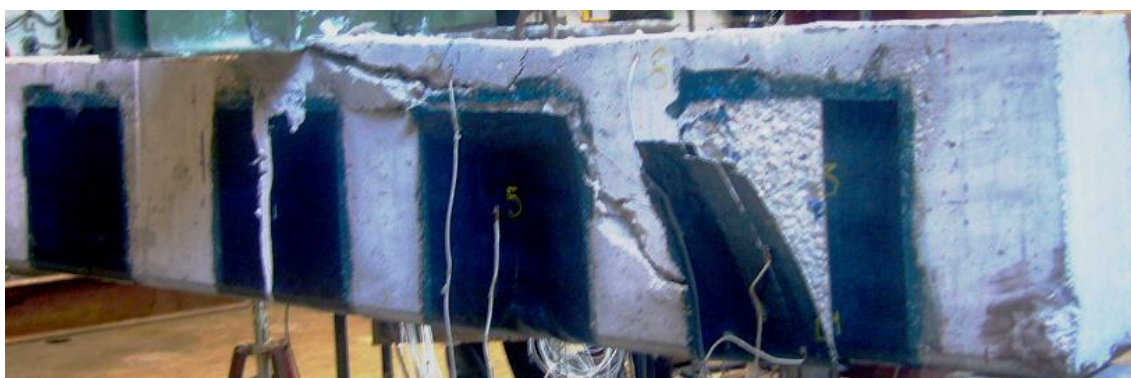


Figura 21: Fallo en vigas con configuración en U a 90° con separación. (Alzate, 2012)

En el caso de vigas con refuerzo en U a 90° y continuo, el fallo es similar al caso anterior. Pero el ángulo de la fisura principal a cortante es variable y se encuentra cercano a los 51° en la parte donde la pendiente es mayor.

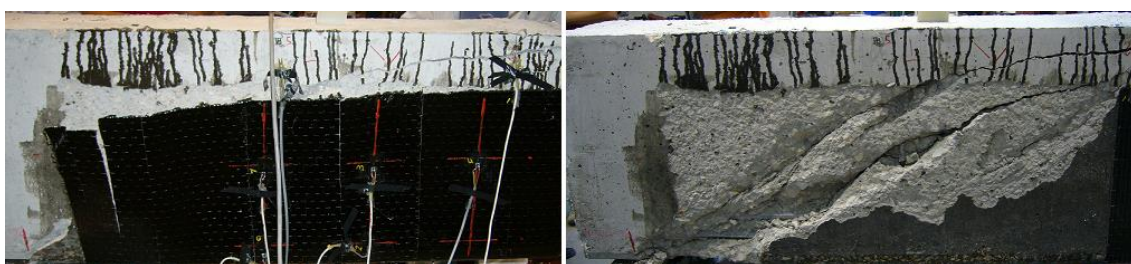


Figura 22: Fallo en vigas con configuración en U a 90° continua. (Alzate, 2012)

Cabe destacar que la evolución de las fisuras no fue controlada a lo largo del ensayo debido a la presencia del tejido de FRP, por lo que el plano final de fisuras se obtuvo removiendo completamente el tejido de FRP al finalizar el ensayo. En la Figura 23 se resumen los esquemas típicos de fisuración en la rotura del espécimen tomados de las vigas con luz larga, que pueden ser también representativos de las vigas con luz corta.

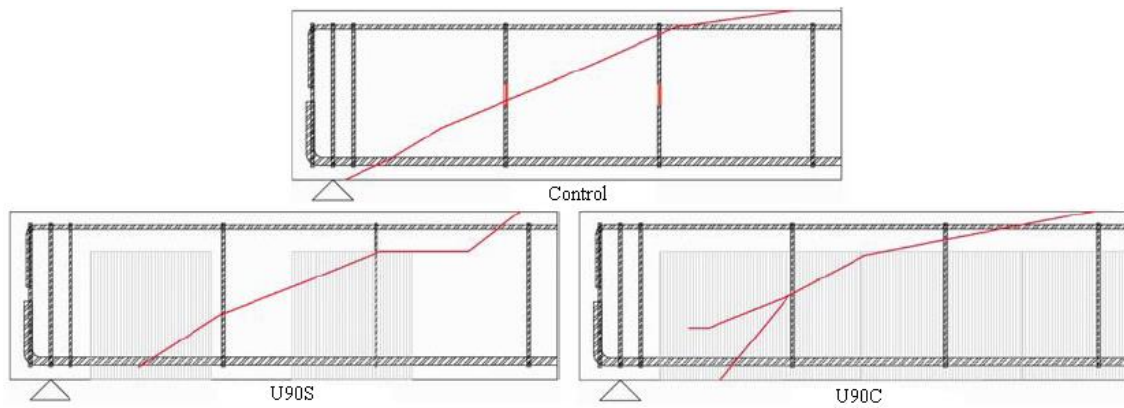


Figura 23: Planos típicos de fisura. (Alzate, 2012)

4.2.3. DESPLAZAMIENTO VERTICAL

En la Figura 24 se resumen gráficamente, separado por gramaje y por longitud de vano, la carga de cortante aplicada y la flecha medida en el centro de vano de las vigas ensayadas.

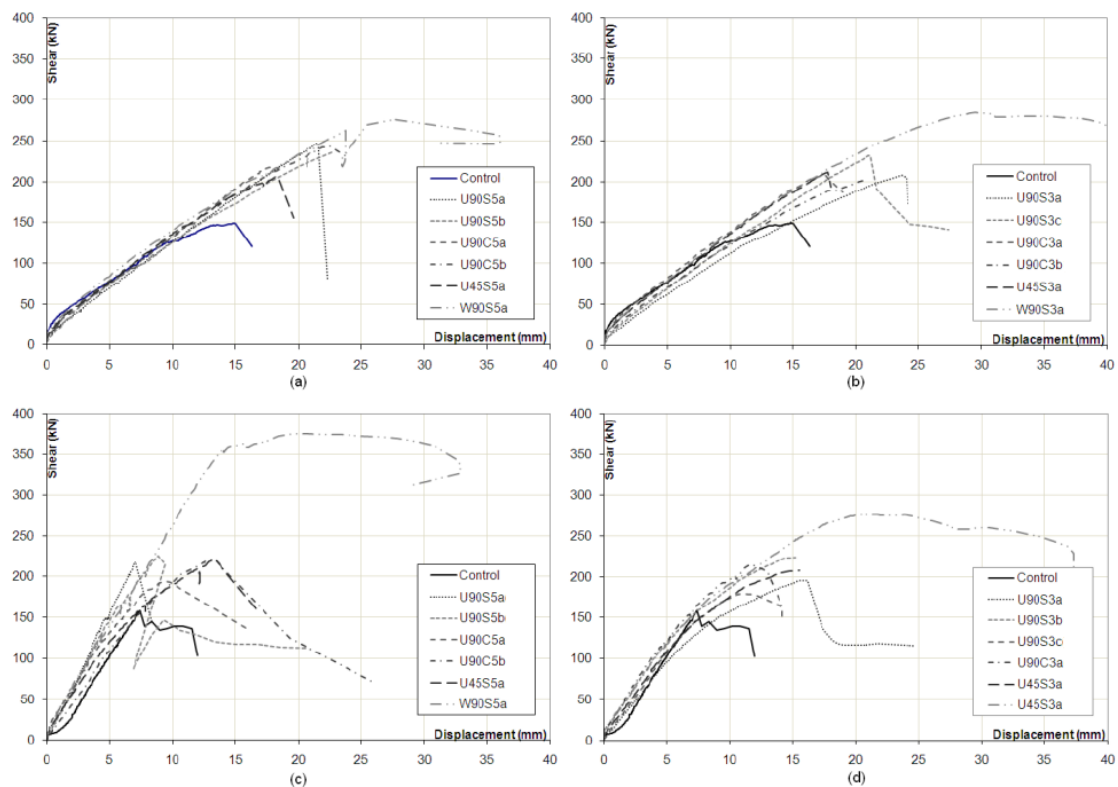


Figura 24: Cortante-flecha en centro de vano, vano largo ((a) y (b)) y corto ((c) y (d)), con 530 g/m^2 ((a) y (c)) y 300 g/m^2 de fibra ((b) y (d)). (Alzate, 2012)

De estas gráficas podemos hacer las siguientes observaciones:

- El uso de refuerzo externo mediante la aplicación de FRP mejora significativamente la capacidad portante de las vigas ensayadas.

- En el caso de las vigas completamente envueltas se incrementa tanto la carga última como la capacidad de deformación.
- Las vigas reforzadas en U con el mismo gramaje pero con orientaciones distintas, 45O y 90O, presentan un incremento similar en resistencia con respecto a la viga de control.
- Las vigas reforzadas en U con tejidos de FRP de mayor gramaje, presentan un leve incremento en resistencia, que oscila entre un 6% y un 12% con respecto a las de menor gramaje, pero no en proporción con el aumento de fibras.

Por otro lado, las curvas cortante-flecha para las vigas reforzadas en configuración U, después del pico de cortante máximo, presentan un descenso abrupto, señalando un tipo de rotura frágil. En cambio, las curvas cortante-flecha para las vigas completamente envueltas, muestran un comportamiento más dúctil.

En cualquier caso, las vigas completamente envueltas tienen un comportamiento mucho mejor que el resto de vigas.

4.2.4. DEFORMACIÓN DE LOS ESTRIBOS

En la Figura 25 se presentan las curvas cortante-deformación en los estribos, como el promedio de las dos ramas verticales del mismo estribo. Cabe destacar que la magnitud de las deformaciones medidas dependen fuertemente de la posición de las bandas extensométricas respecto a la posición de la fisura principal (Balázs, 1993). La Figura 23 muestra que, excepto para la viga con configuración W90S, la fisura principal corta el primer estribo instrumentado (el más cercano al apoyo) aproximadamente a la mitad de su altura, coincidiendo con la posición de las bandas extensométricas. Por lo que las medidas máximas tomadas pueden considerarse representativas de las deformaciones últimas que pueda llegar a alcanzar el refuerzo interno.

Tanto en la viga de control como en las vigas reforzadas con FRP, los estribos de acero empiezan a desarrollar deformaciones una vez aparece la primera fisura de cortante en el hormigón. Tomando el valor medio obtenido para los ensayos con luz larga y corta, se tiene que para la viga de control, los estribos comienzan a desarrollar deformaciones a un cortante medio de 90 kN, el cual se compara bien con el valor aproximado de 85 kN para el cual se detecta la primera fisura de cortante. Para las vigas reforzadas con FRP, los estribos comienzan a desarrollar deformaciones a un cortante entre 110 y 130 kN.

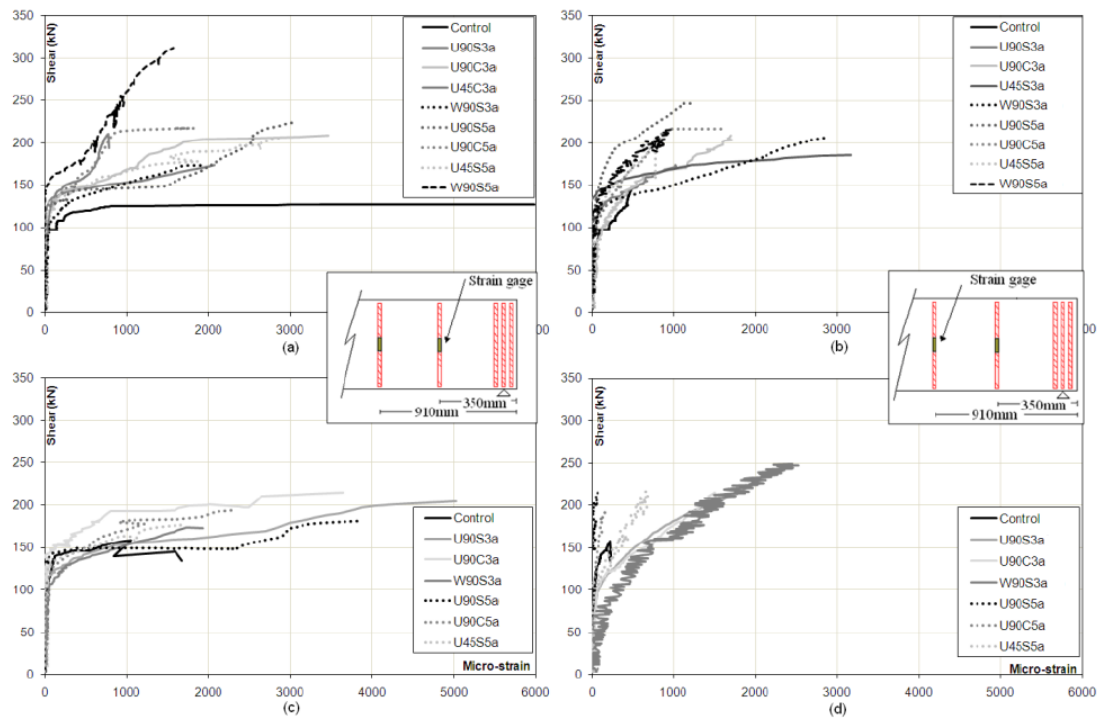


Figura 25: Deformaciones en los estribos para vano largo ((a) y (b)) y corto ((c) y (d)), con 530 g/m^2 ((a) y (c)) y 300 g/m^2 de fibra ((b) y (d)). (Alzate, 2012)

4.2.5. DEFORMACIONES EN EL FRP

En la figura 26 se muestra las deformaciones máximas medidas en el tejido de FRP registradas por las bandas extensométricas más cercanas a la fisura principal de cortante.

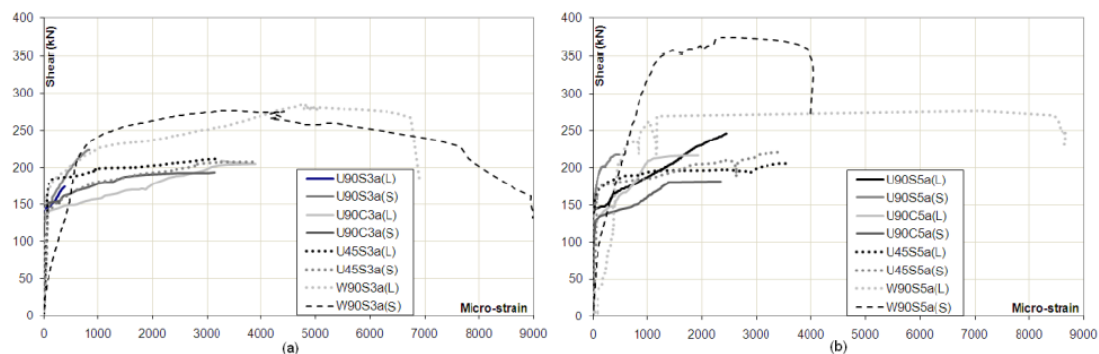


Figura 26: Deformación máxima en el FRP para vigas con: (a) 530 g/m^2 y (b) 300 g/m^2 . (Alzate, 2012)

Para las vigas reforzadas en U no se obtuvieron deformaciones superiores a 4000×10^{-6} aprovechándose sólo un tercio de la capacidad de deformación del tejido de FRP, mientras que para las vigas con la sección completamente envuelta se alcanzaron valores de 8000×10^{-6} . Por otro lado, las demás bandas extensométricas no registraron valores mayores de 2000×10^{-6} a excepción de las bandas colocadas en las vigas con la sección completamente envuelta donde algunas alcanzan deformaciones de aproximadamente 4500×10^{-6} .

4.2.6. INTERACCIÓN ENTRE ESFUERZOS

En la Figura 27 se comparan las deformaciones medidas en los estribos y en el FRP, donde las bandas extensométricas coinciden o están suficientemente próximas, lo cual generalmente ocurre en el primer estribo instrumentado, y donde se registran las mayores deformaciones.

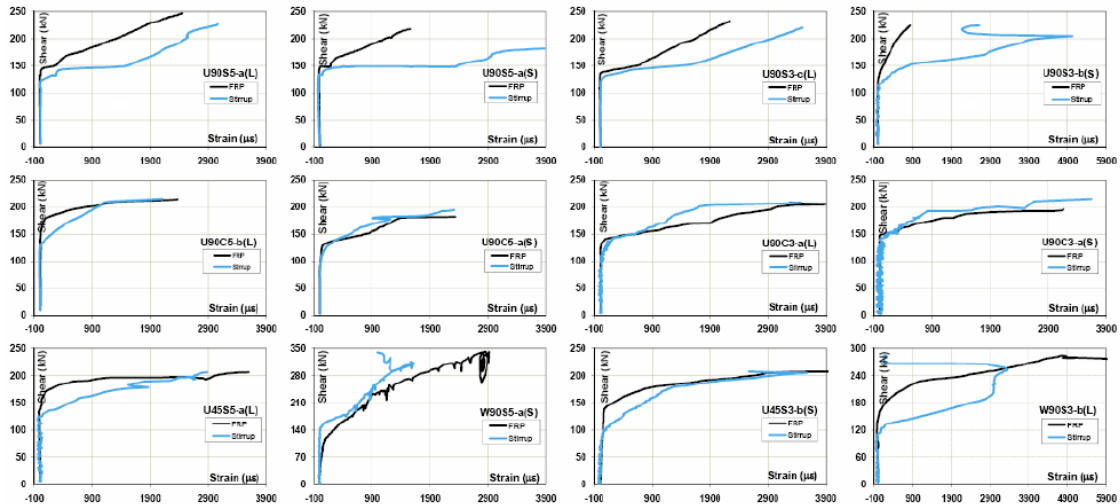


Figura 27: Comparación entre las deformaciones en los estribos y el CFRP en una misma viga. (Alzate, 2012)

Para las vigas reforzadas en U, una vez aparecen las primeras fisuras de cortante, los estribos entran en carga registrando deformaciones que crecen constantemente. Un poco más tarde, el FRP entra en carga deformándose rápidamente hasta alcanzar una deformación similar a la de los estribos. Entonces, una vez el FRP y los estribos alcanzan deformaciones similares, ambos refuerzos registran similares deformaciones. Por otra parte, el otro estribo instrumentado sólo registra una moderada deformación, ya que la fisura principal se encuentra bastante alejada.

Para las vigas completamente envueltas, se presentan varias similitudes con el caso anterior: los estribos se empiezan a deformar primero y no se tienen grandes deformaciones en las bandas extensométricas más alejadas de la fisura. Sin embargo, no se presenta acoplamiento de deformaciones entre estribos y FRP. Una vez los estribos alcanzan su punto de fluencia, el FRP es el que resiste únicamente el esfuerzo cortante. Además, como se tiene un alto grado de anclaje, se aprovechan mejor las propiedades del FRP llegando a deformaciones mayores a un esfuerzo cortante mayor.

4.3. COMPARACIÓN RESULTADOS NUMÉRICOS-EXPERIMENTALES

En este apartado se presenta los resultados numéricos obtenidos con el programa CONSHEAR para las vigas de vano largo con configuración en U continua y con separación, y para los gramajes de 530 g/m² y 300 g/m². Y se comparan con sus respectivos resultados experimentales de la tesis doctoral de Alzate (2012), vistos en el apartado anterior.

No hemos creído conveniente considerar los ensayos para vanos cortos, ya que las vigas pueden haber sufrido algún tipo de daño y por lo tanto, estos daños no quedarían representados en los resultados numéricos pero sí en los experimentales.

La malla de elementos finitos usada en la simulación numérica está formada por elementos viga de 0,1m de longitud, como se representa en la figura 28.

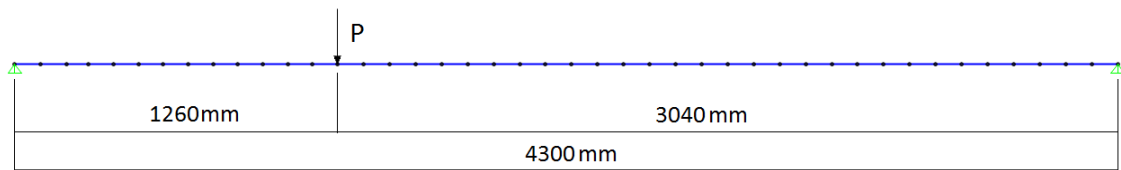


Figura 28: Elementos viga de la simulación numérica.

Su sección transversal se discretiza en fibras de acuerdo con la figura 29, la armadura longitudinal se simula con filamentos de acero, el acero transversal y el FRP se reparte en la fibra con sus respectivas cuantías y propiedades.

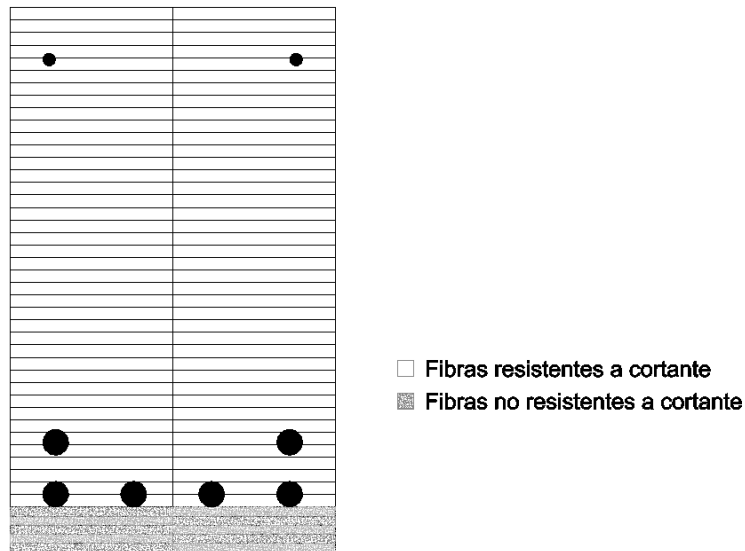


Figura 29: Sección transversal de la malla de la simulación numérica.

Entonces, se aplica la carga a una velocidad de 0.30 kN/s de forma continua hasta la rotura. Para las vigas con configuración en U, se considera el criterio Debonding presentado en el capítulo anterior. Los parámetros relacionados con el fallo por desprendimiento prematuro son: $\tau_{LM} = 2,24$ MPa y $G_F = 0,717$ MPa·mm, y t_L que varía según el gramaje del FRP.

4.3.1. CORTANTE DE ROTURA

En la tabla 6, se resumen los cortantes de rotura experimentales y los numéricos para las vigas analizadas, y su relación:

Tabla 6: Cortantes de rotura experimentales y numéricos. (Alzate, 2012)

Cortante de rotura experimental		Cortante de rotura numérico		Experimental Numérico
[kN]		[kN]		
U90S5-a (V2)	246.73	U90S5	240.37	1.0265
U90S5-b (V11)	235.92			0.9815
U90C5-a (V3)	217.04	U90C5	282.79	0.7675
U90C5-b (V5)	243.27			0.8602
U90S3-a (V8)	207.43	U90S3	233.30	0.8891
U90S3-b (V9)	203.61			0.8727
U90S3-c (V12)	231.82			0.9937
U90C3-a (V13)	208.84	U90C3	226.23	0.9231
U90C3-b (V14)	201.77			0.8919
Promedio	222.77	Promedio	245.67	0.9068

Como podemos observar, los cortantes de rotura muestran una amplia dispersión. A pesar de ello, el valor medio obtenido de todos los ensayos analizados es muy parecido, por lo que pueden considerarse equivalentes.

4.3.2. DESPLAZAMIENTO VERTICAL

En la figura 31 se resumen gráficamente, separado por la configuración del FRP y por gramaje, la carga cortante aplicada y la flecha media en el centro de vano de las vigas ensayadas en la tesis de Alzate y sus respectivas simulaciones numéricas.

Estas simulaciones se hacen escogiendo un elemento y fibra que se introducen para realizar la simulación. Por este motivo, realizamos un barrido de varias combinaciones de elementos y fibras, y así, poder encontrar el elemento y la fibra que represente el dispositivo de control de las vigas ensayadas.

A continuación, para una mayor comprensión de la leyenda, se representa el elemento 7 y la fibra 23.

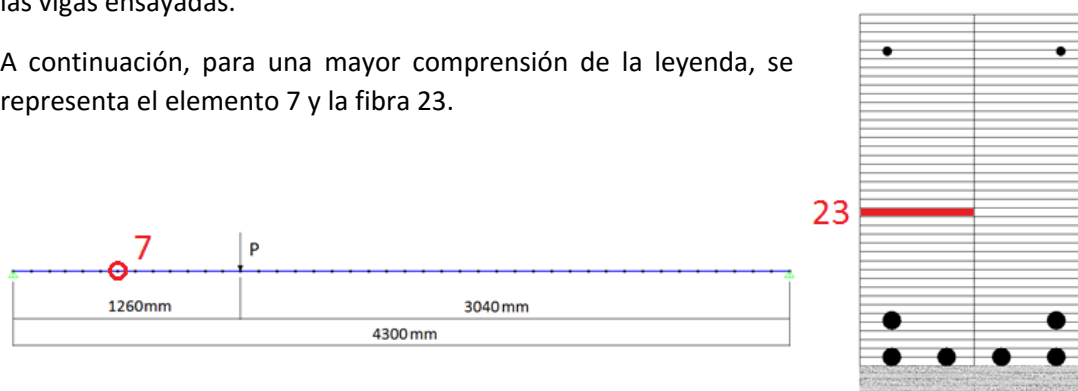
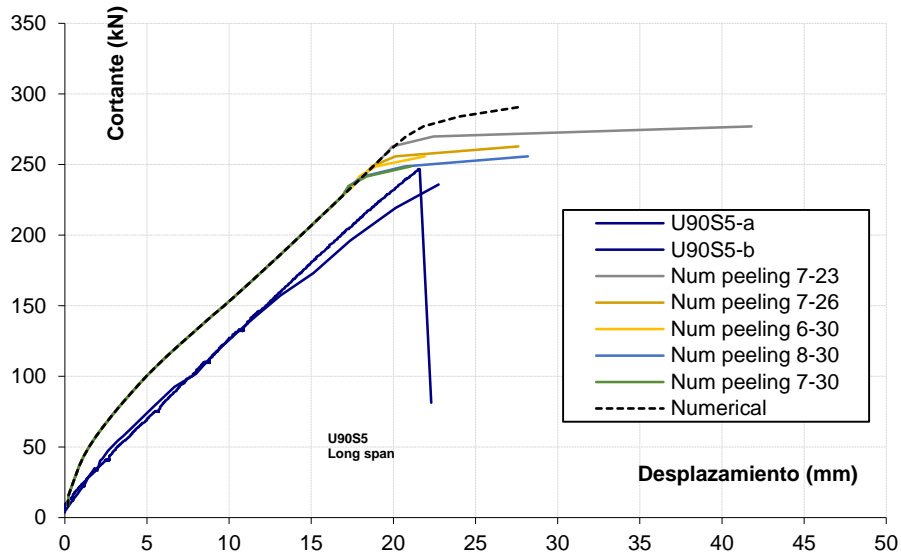
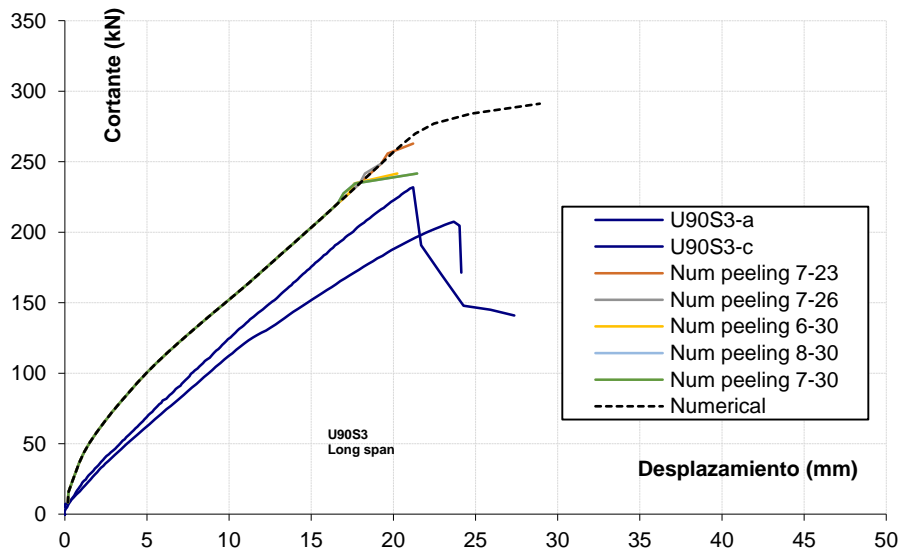


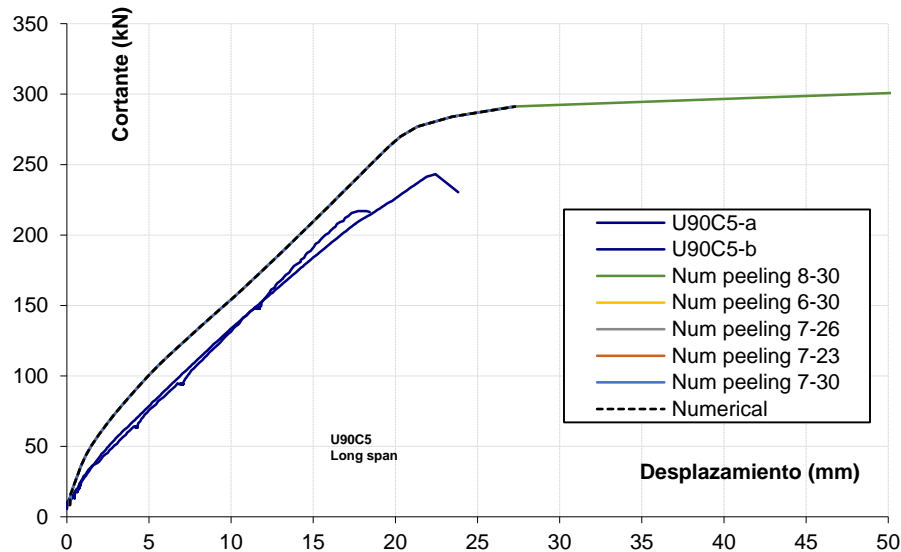
Figura 30: Elemento 7 y fibra 23 (Num peeling 7-23)



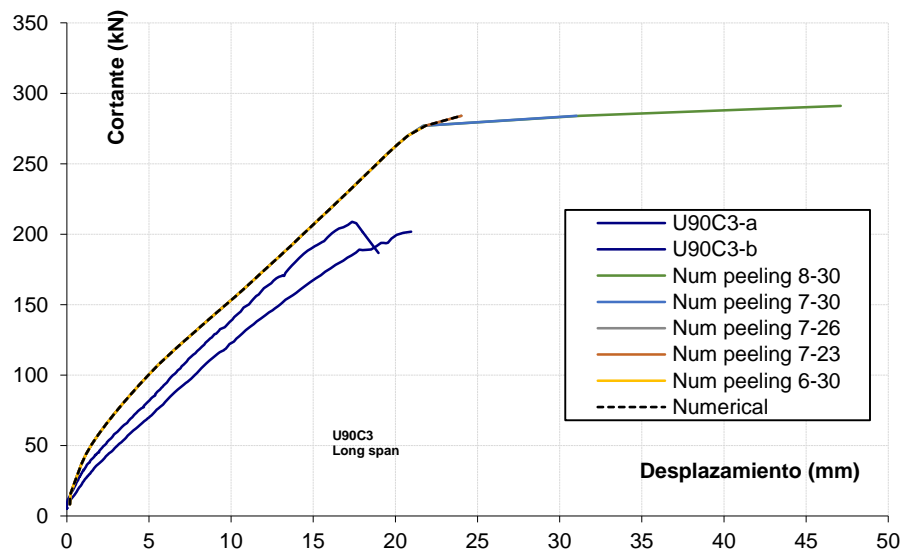
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 31: Cortante-flecha en centro de vano, con refuerzo separado ((a) y (b)) y refuerzo continuo ((c) y (d)), y con 530 g/m² ((a) y (c)) y 300 g/m² de fibra ((b) y (d)).

De estas gráficas se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Las vigas con configuración en U muestran una caída abrupta en su rama descendiente, señalando un tipo de rotura frágil.
- Las vigas de mayor gramaje presentan un pequeño incremento en resistencia con respecto a las de menor gramaje, pero no en proporción con el aumento de fibra.
- Para las vigas con mayor gramaje y para las vigas con refuerzo separado, el elemento 7 y la fibra 30 son los que mejor representan las curvas de tensión-flecha de las vigas ensayadas. En cambio, para las vigas de menor gramaje y con refuerzo continuo es el elemento 6 y la fibra 30.

Los resultados numéricos no se acaban de ajustar a los resultados experimentales, pero muestran una tendencia similar, concretamente en la zona elástica. Por otro lado, a medida que aumenta el cortante, los resultados numéricos distan un poco con los experimentales pero llegan al límite plástico en puntos similares al experimental.

4.3.3. DEFORMACIÓN DE LOS ESTRIBOS

En las figuras 34, 35, 36 y 37 se muestran las curvas cortante-deformación en los estribos para los distintos tipos de vigas y sus respectivos resultados numéricos.

Los resultados experimentales, se han agrupado por tipos de viga de acuerdo con los grupos y numeración de la tabla 5. Además, los sensores están numerados según su configuración de FRP. Las siguientes figuras muestran la numeración de los sensores según su configuración:

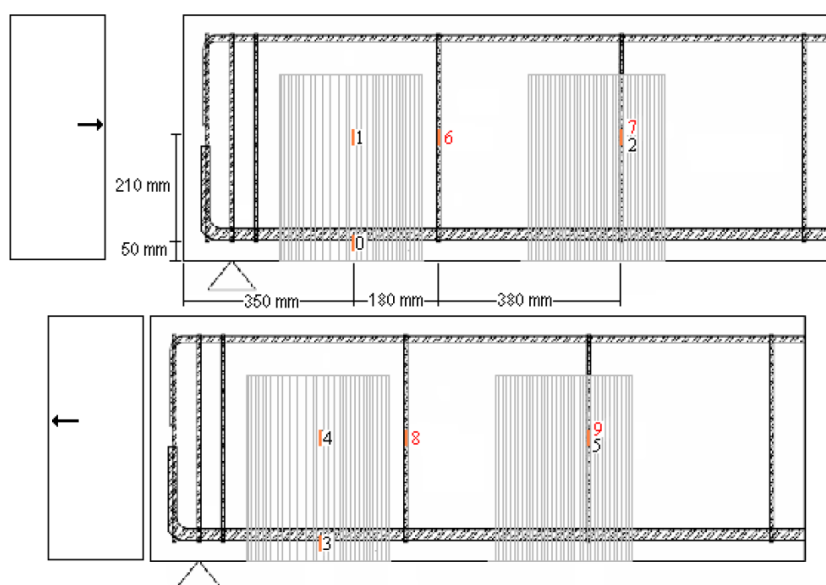


Figura 32: Numeración de los sensores para FRP con configuración separada. (Alzate, 2012)

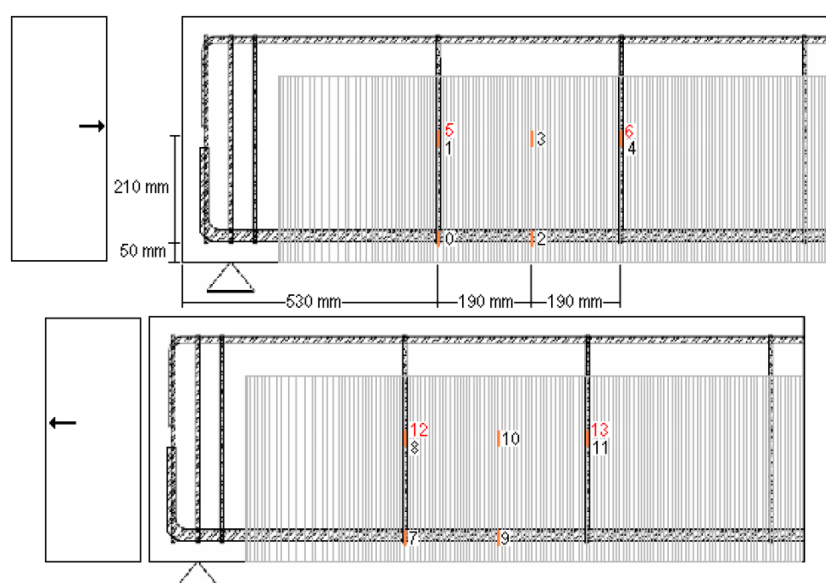


Figura 33: Numeración de los sensores para FRP con configuración continua. (Alzate, 2012)

Los estribos de acero empiezan a desarrollar deformaciones una vez aparece la primera fisura de cortante en el hormigón. Para las vigas ensayadas, los estribos empiezan a desarrollar deformaciones a un cortante entre 110 y 130 kN.

Para obtener los resultados numéricos, sacamos las deformaciones de los estribos de los elementos y fibras que coinciden con los sensores. Para la localización y numeración de los sensores, ver las figuras 31 y 32.

Debido a la suposición que hemos hecho sobre la creación de las fisuras, los estribos, según el modelo numérico, empiezan a desarrollar deformaciones a valores un poco superiores, entre 130 y 160 kN. A pesar de esto, las deformaciones que se observan, siguen la misma tendencia y las deformaciones se representan bien con el modelo, aunque acaban siendo un poco superiores a las experimentales. Por lo que podemos concluir que se representan bien los resultados, y que además estamos del lado de la seguridad.

Por otro lado, con el modelo numérico, los estribos se continúan deformando hasta que todo el acero ha plastificado y, por eso, en las gráficas aparecen unas deformaciones superiores.

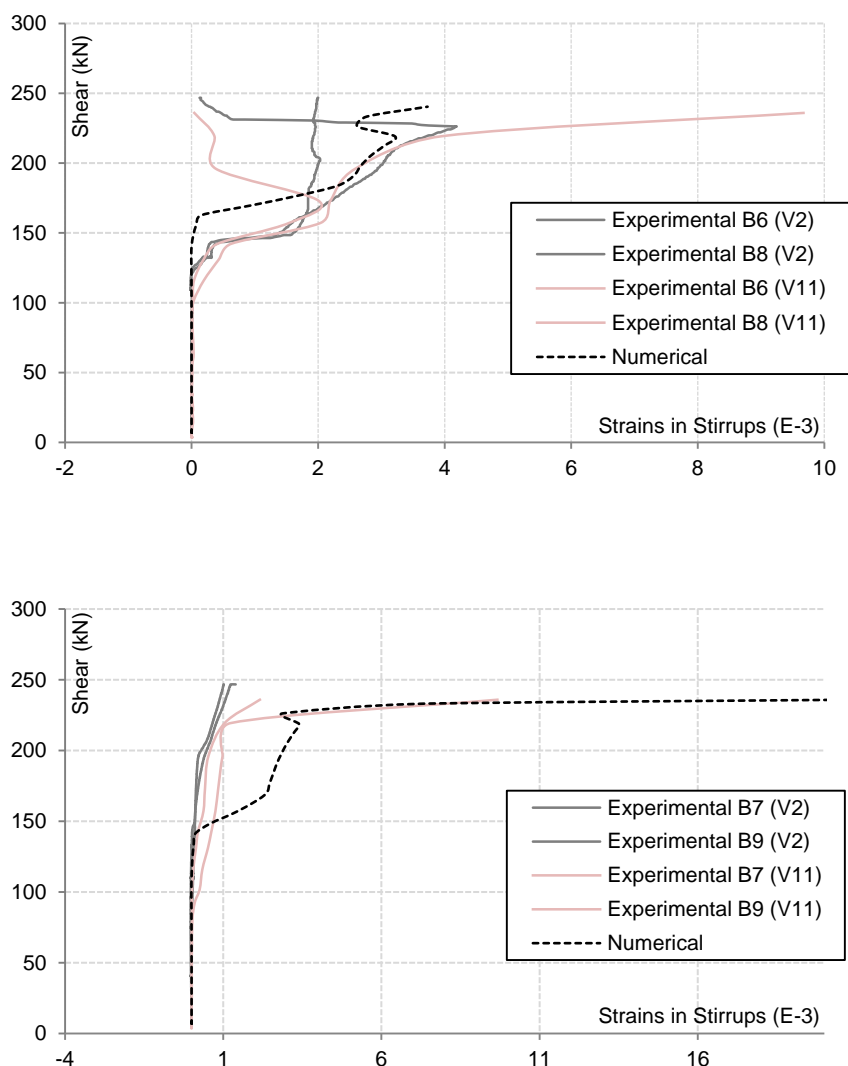


Figura 34: Deformaciones en los estribos para refuerzo separado y gramaje de 530 g/m²

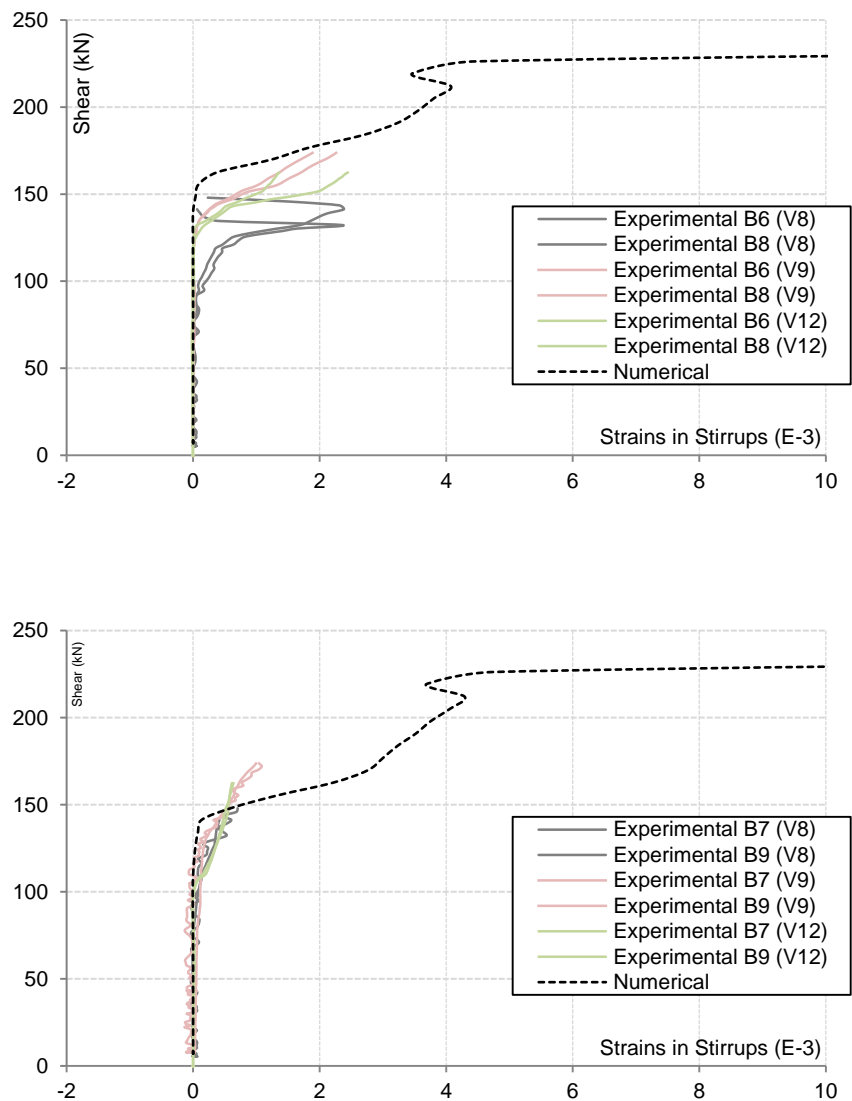


Figura 35: Deformaciones en los estribos para refuerzo separado y gramaje de 300 g/m²

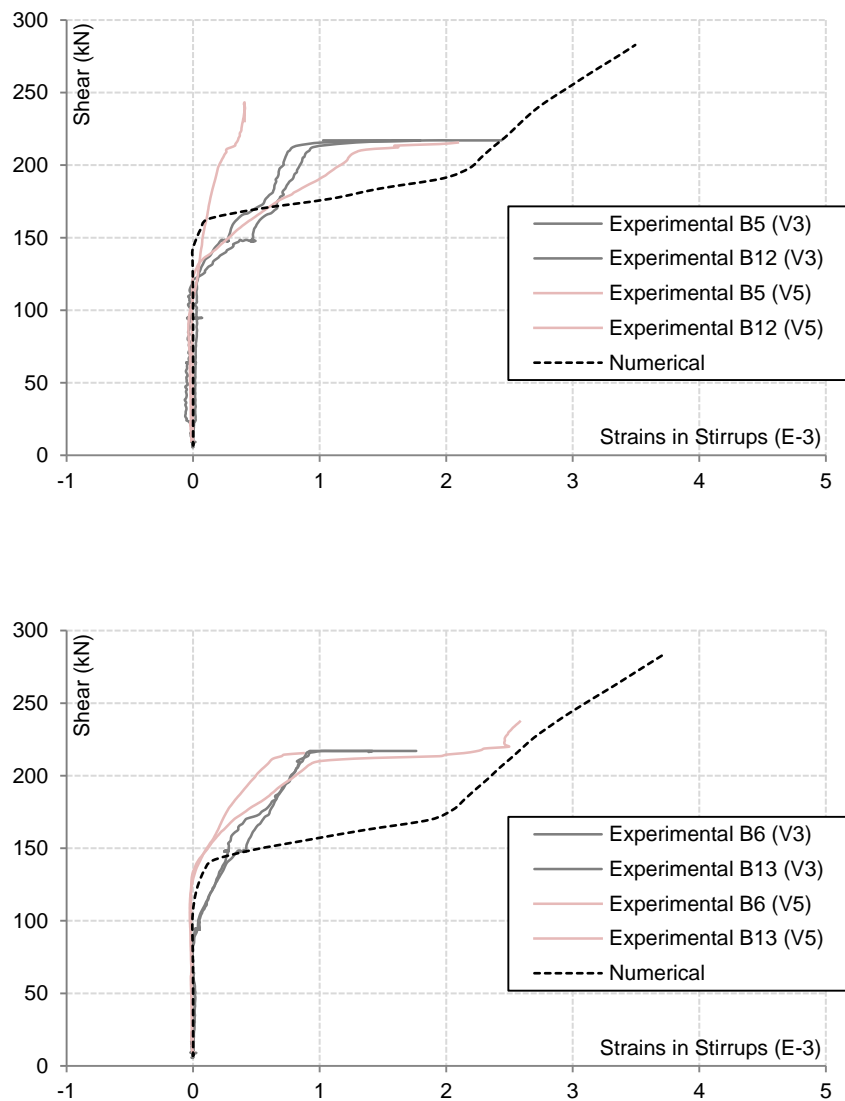


Figura 36: Deformaciones en los estribos para refuerzo continuo y gramaje de 530 g/m²

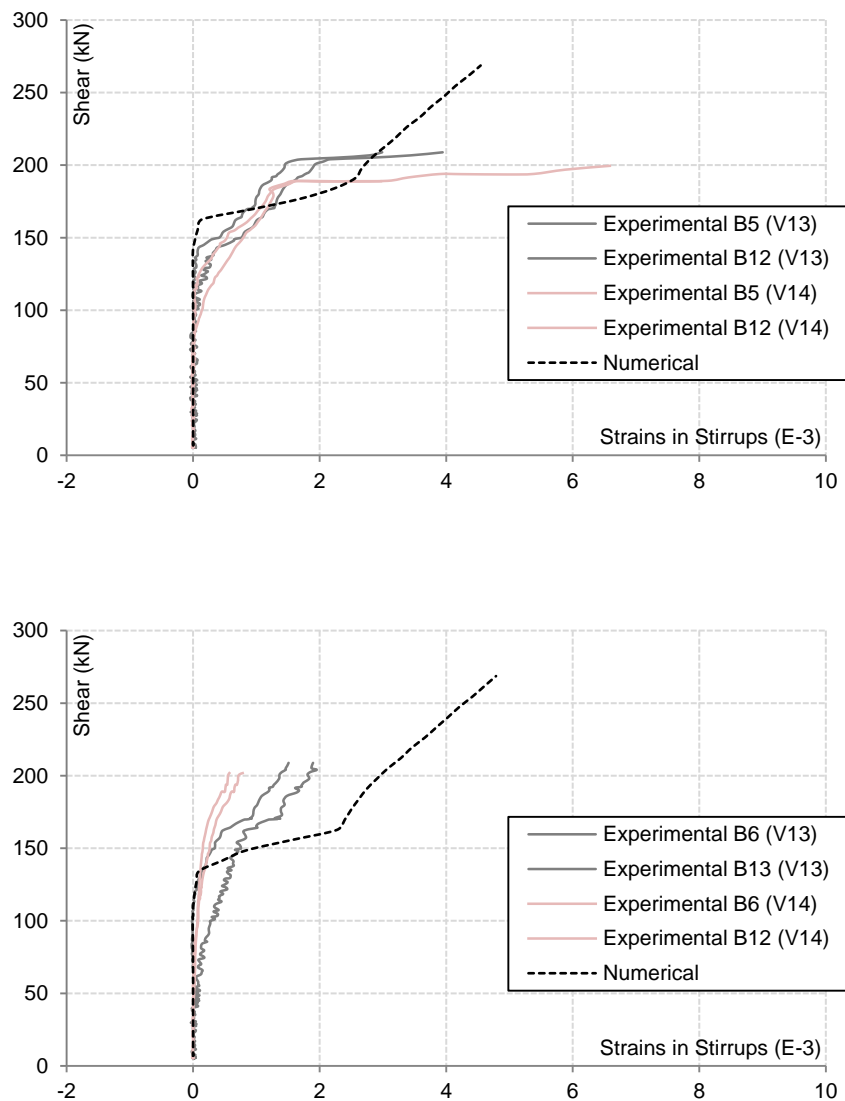


Figura 37: Deformaciones en los estribos para refuerzo continuo y gramaje de 300 g/m²

4.3.4. DEFORMACIONES EN EL FRP

En las figuras 35, 36, 37 y 38 se muestran las deformaciones máximas medidas en el tejido de FRP registradas en los distintos tipos de vigas ensayadas, y sus respectivos resultados numéricos. Para la localización y numeración de los sensores, ver las figuras 31 y 32.

Para obtener los resultados numéricos, sacamos las deformaciones del FRP de los elementos y fibras que coinciden con los sensores. Para la localización y numeración de los sensores, ver las figuras 31 y 32.

En estas gráficas podemos observar 3 tendencias, las cuáles las podemos asociar al proceso que sigue el FRP en los ensayos. En la primera fase no se producen deformaciones en el FRP ya que son el hormigón y los estribos los que resisten los esfuerzos. En la segunda fase, son los estribos y el FRP los que se deforman debido al aumento de las tensiones que antes resistía la cabeza comprimida de hormigón. Además, el acero de los estribos se encuentra en fase elástica. En la tercera fase, de pendiente mayor que la segunda, el FRP se deforma hasta que se desprende el laminado y ya no se deforma más. El FRP se deforma en mayor medida debido a que el acero de los estribos ya ha plastificado.

Para las vigas ensayadas en U no se obtuvieron deformaciones superiores a 4000×10^{-6} , aprovechándose sólo un tercio de la capacidad de deformación del tejido de FRP y poniendo de manifiesto que el efecto peeling nos reduce la capacidad resistente frente a cortante.

En los resultados numéricos obtenemos unas deformaciones sustancialmente superiores pero que siguen la misma tendencia que los resultados experimentales. Es por esto que podemos concluir que se representan bien los resultados, y que además estamos del lado de la seguridad.

Los resultados experimentales, se han agrupado por tipos de viga de acuerdo con los grupos y numeración de la tabla 5. Además, los sensores están numerados según su configuración de FRP. Para la localización y numeración de los sensores, ver las figuras 31 y 32.

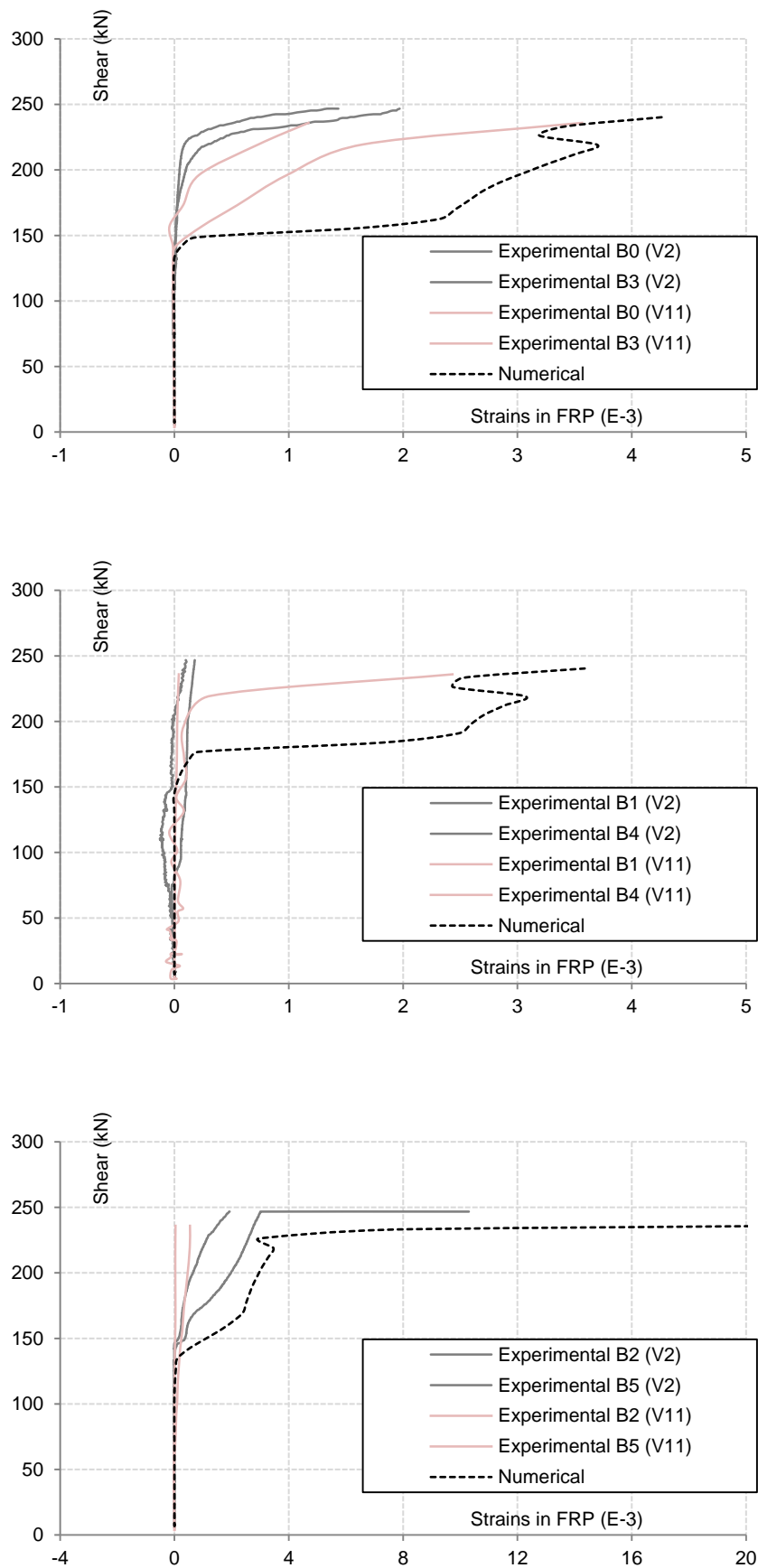


Figura 38: Deformaciones en FRP para refuerzo separado y gramaje de 530 g/m²

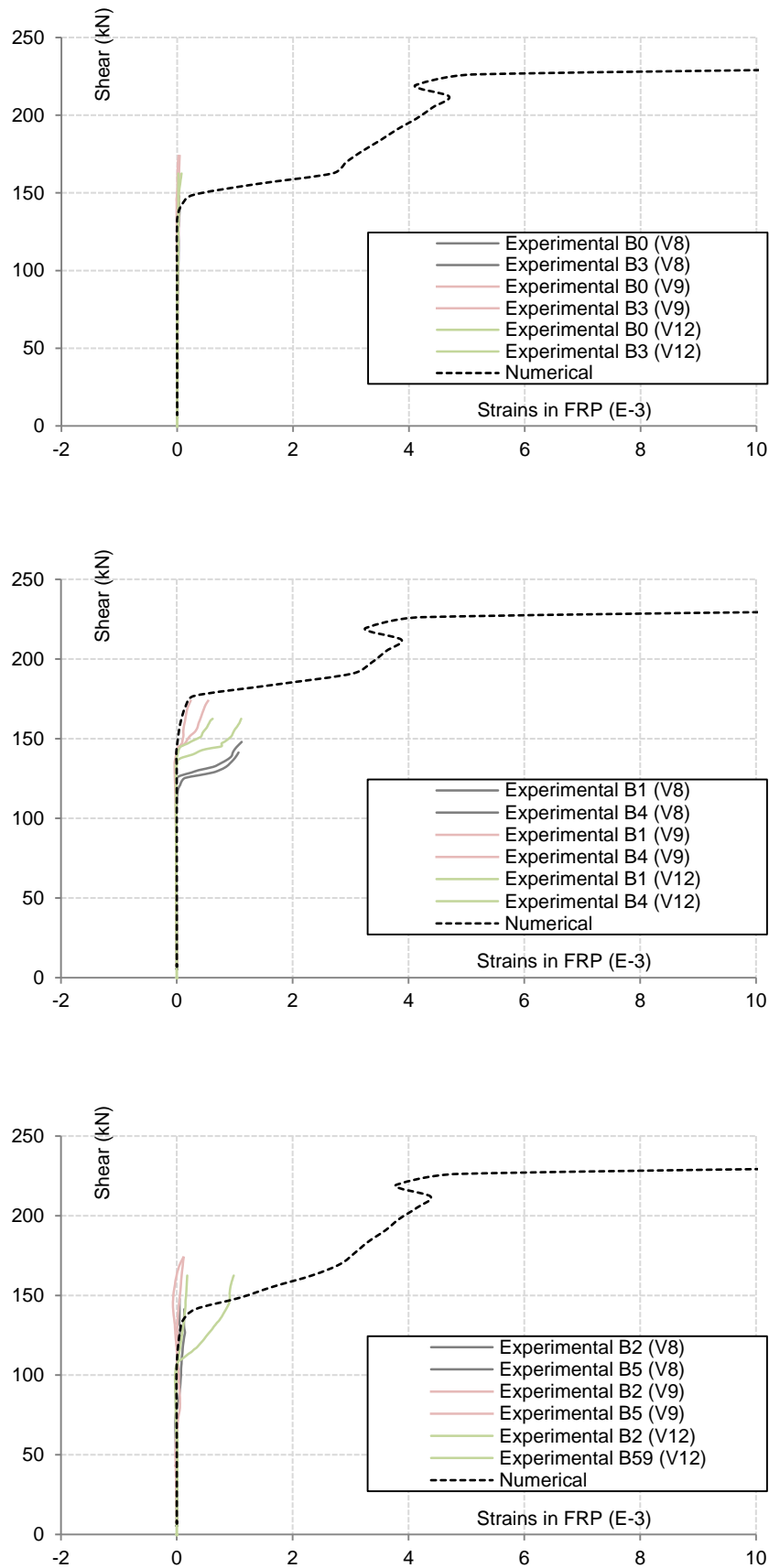
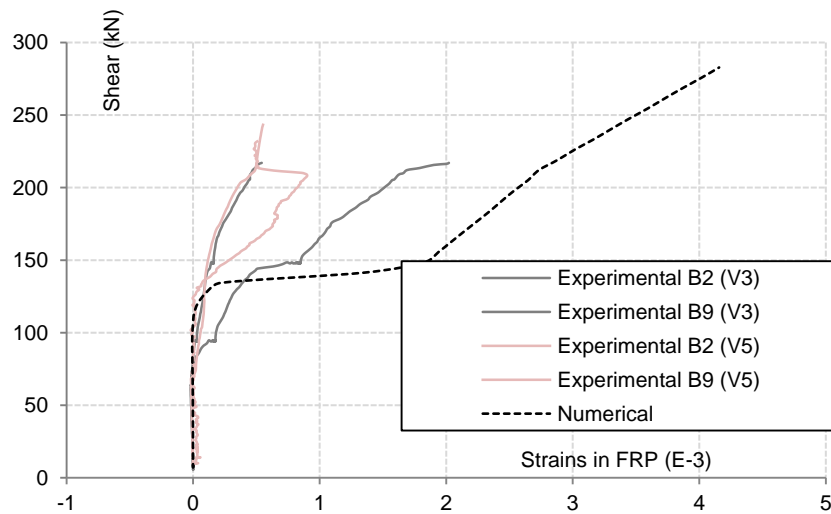
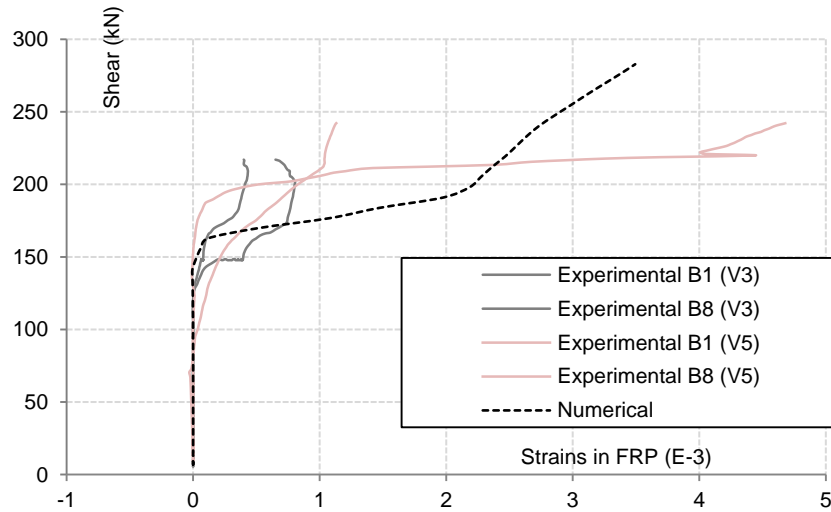
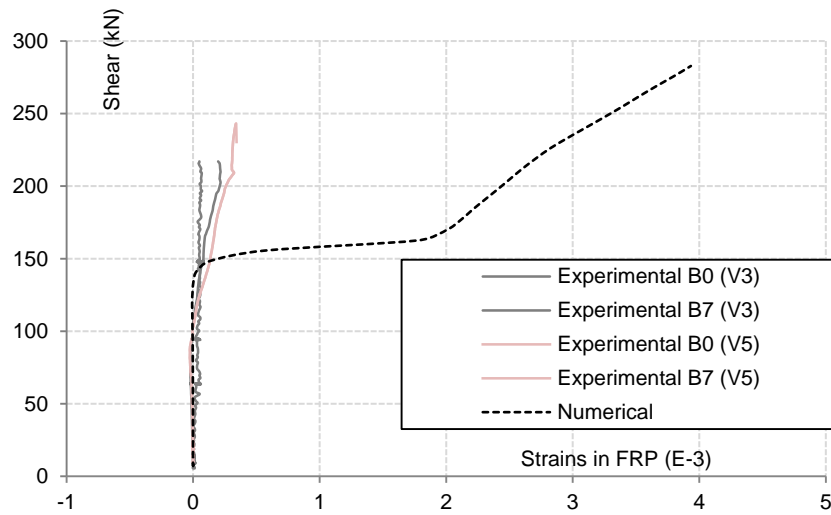


Figura 39: Deformaciones en FRP para refuerzo separado y gramaje de 300 g/m²



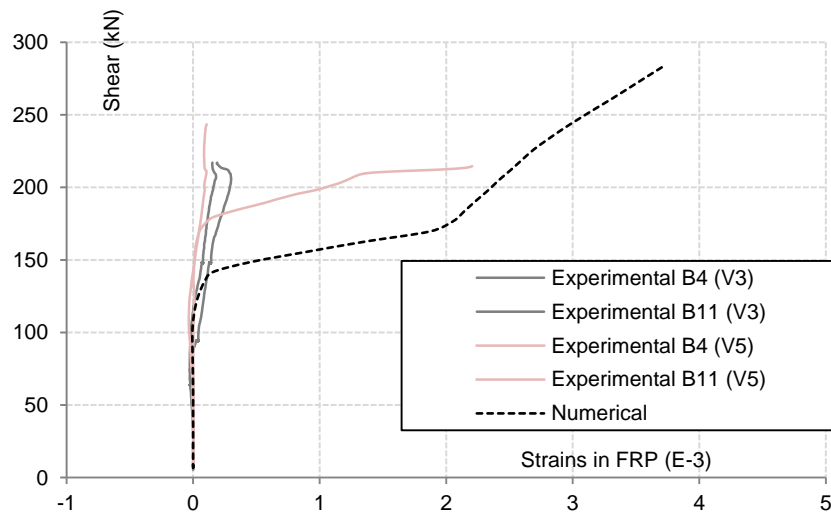
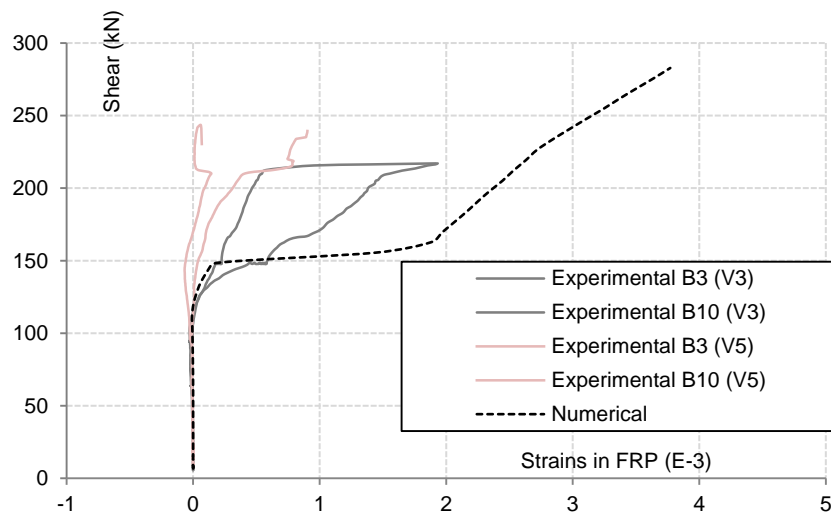
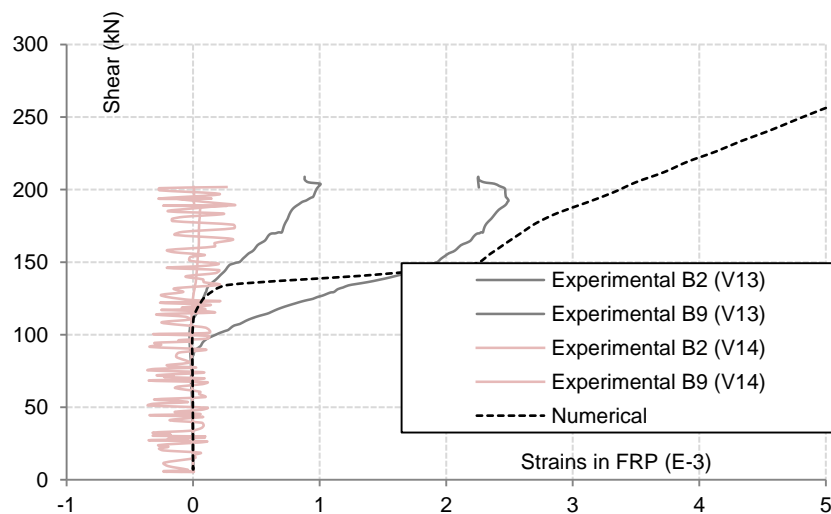
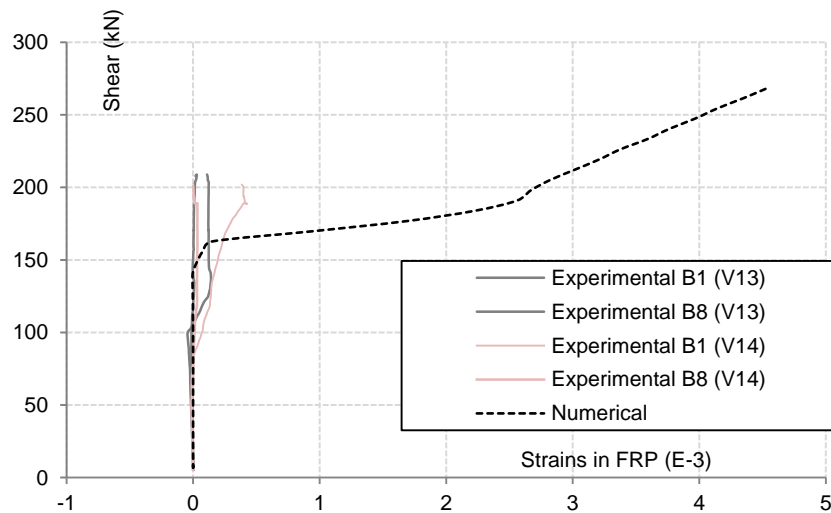
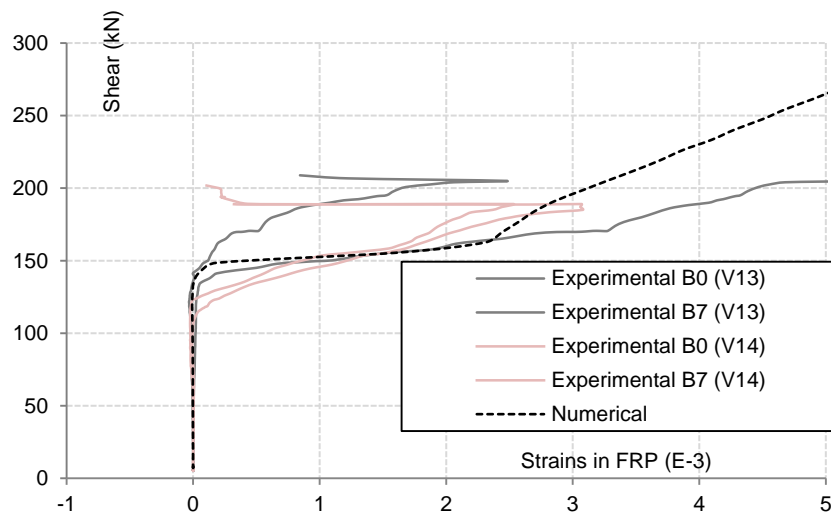


Figura 40: Deformaciones en FRP para refuerzo continuo y gramaje de 530 g/m²



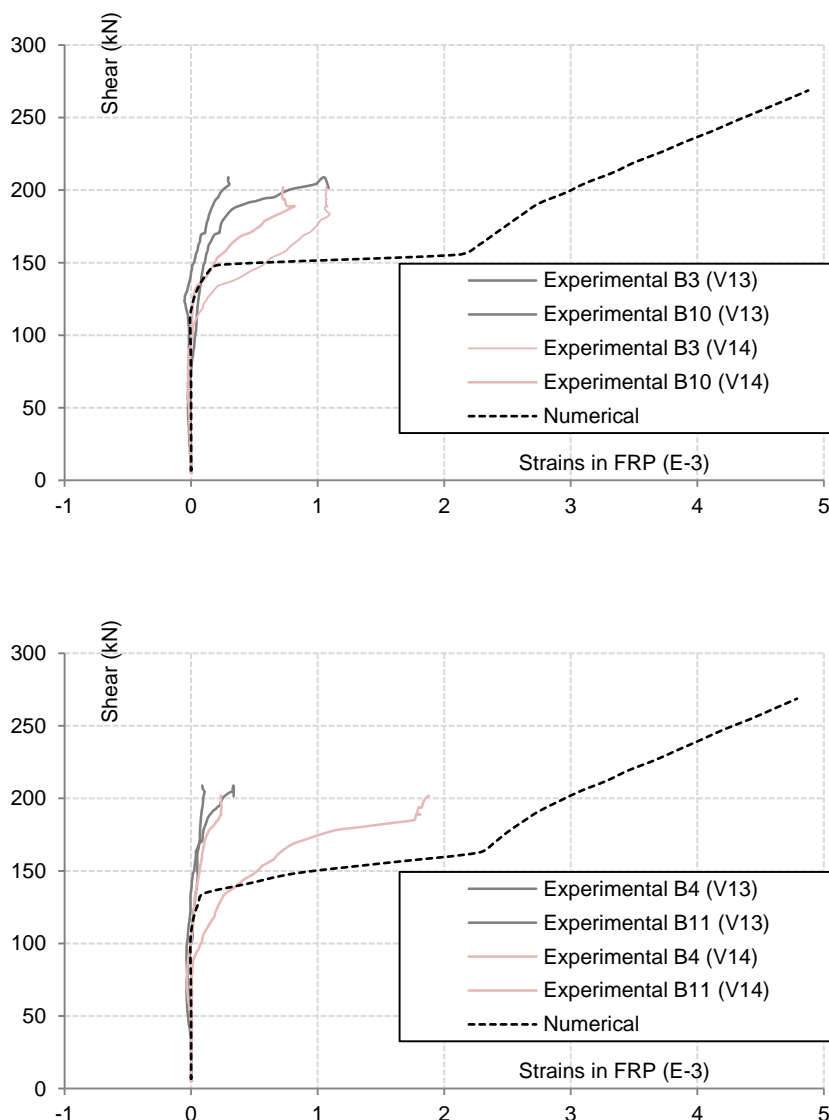


Figura 41: Deformaciones en FRP para refuerzo continuo y gramaje de 300 g/m²

4.3.5. TENSIONES EN EL FRP

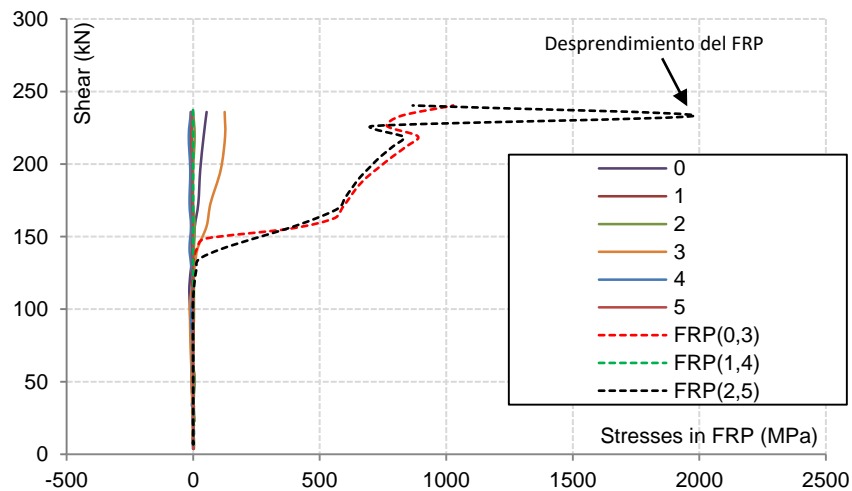
La figura 37 muestra las tensiones del tejido FRP, obtenidas con el modelo numérico y que ponen de manifiesto algunas de las observaciones hechas anteriormente.

Para obtener los resultados numéricos, sacamos las tensiones del FRP de los elementos y fibras que coinciden con los sensores. Para la localización y numeración de los sensores, ver las figuras 31 y 32.

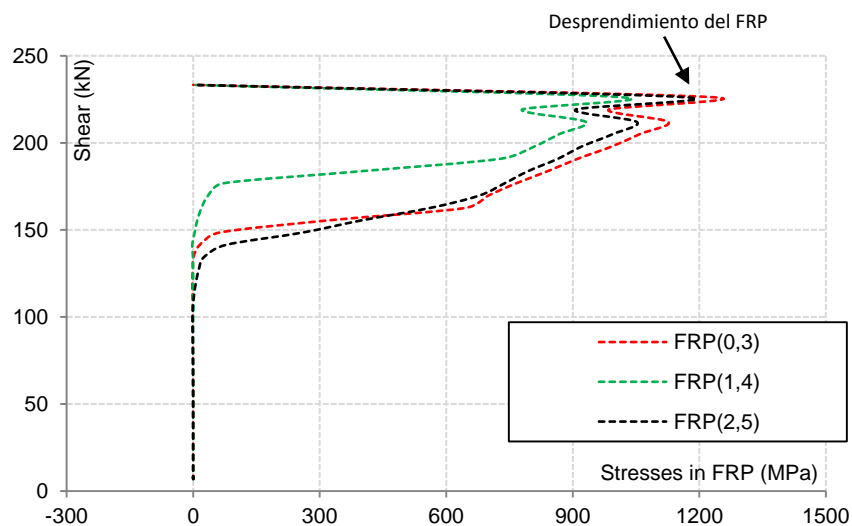
Podemos observar claramente las 3 fases que podemos asociar al proceso que sigue el FRP en los ensayos. Una primera fase, donde el FRP no recibe tensiones ya que la cabeza comprimida de hormigón y los estribos de acero se encargan de resistir el cortante. Cuando aparecen las primeras fisuras y se desarrollan deformaciones en los estribos, a un cortante entre 130 y 160

KN, el FRP y los estribos se encargan de soportar las tensiones. Finalmente, una vez el acero pasa de la zona elástica a plastificar, el FRP es el encargado de resistir el cortante hasta que se produce el desprendimiento prematuro del laminado y se produzca rotura de la viga. Una vez se desprende el FRP, las tensiones se transfieren al acero ya plastificado, que no puede resistir las tensiones, y se produce el fallo de la viga por cortante.

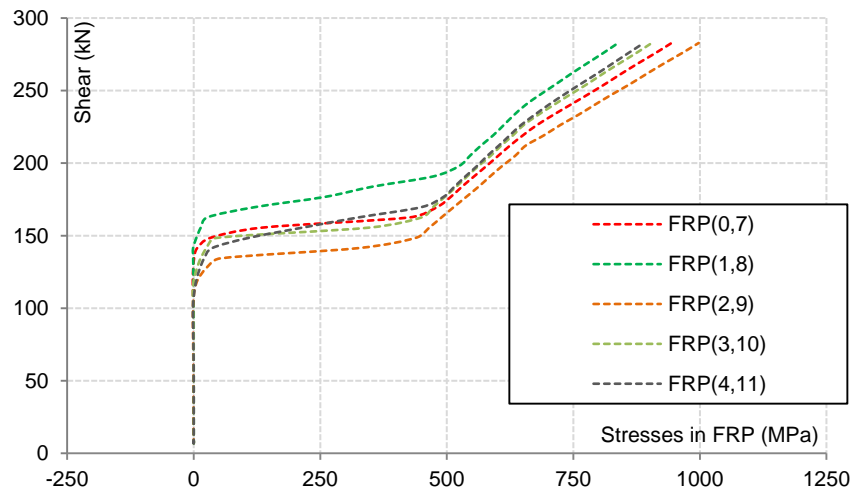
Los resultados experimentales, se han agrupado por tipos de viga de acuerdo con los grupos y numeración de la tabla 5. Además, los sensores están numerados según su configuración de FRP. Para la localización y numeración de los sensores, ver las figuras 31 y 32.



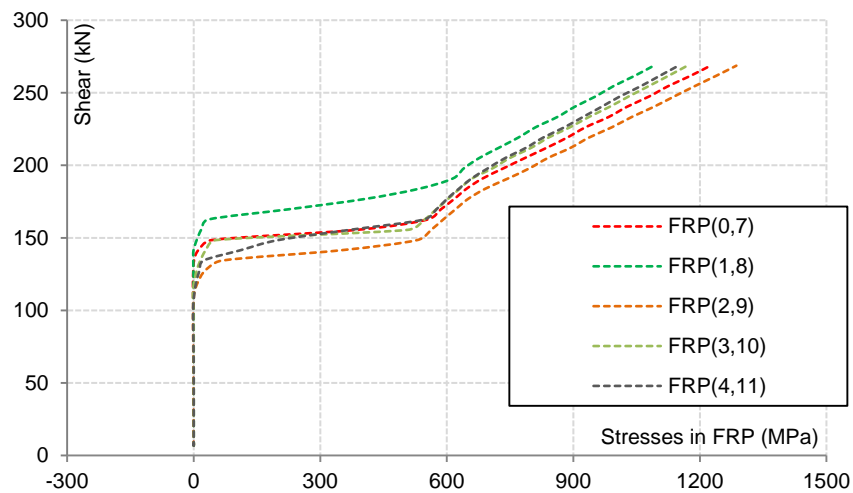
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 42: Tensiones en el FRP, con refuerzo separado ((a) y (b)) y refuerzo continuo ((c) y (d)), y con 530 g/m² ((a) y (c)) y 300 g/m² de fibra ((b) y (d)).

5. CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo, que consiste en avanzar en el conocimiento relativo al comportamiento a cortante de elementos de HA reforzado con FRP y los objetivos específicos indicados en el capítulo 1, se han alcanzado satisfactoriamente.

Se ha expuesto en el estado del conocimiento las propiedades del FRP, las distintas posibles configuraciones del FRP y los modos de rotura para así conocer la capacidad resistente que aporta el FRP.

Por otro lado, se ha presentado un programa experimental realizado para la tesis de Alzate (2012) que, además de contar con una extensa base de datos, ha aportado datos que nos permiten analizar la problemática existente acerca del desprendimiento prematuro del FRP. El modo de fallo de las vigas ensayadas reforzadas en U, en todos los casos, ha sido por desprendimiento del laminado de FRP del hormigón.

Con base a esto, se pretende analizar numéricamente el desprendimiento prematuro de vigas de hormigón armado reforzadas con FRP. Para ello, se extiende el modelo CONSHEAR (Ferreira, 2013) para tener en cuenta este tipo de fallo prematuro, mediante la incorporación de un criterio de desprendimiento prematuro del FRP. Este criterio se basa en el modelo presentado anteriormente por Oller (2005), que considera los efectos del desprendimiento prematuro del FRP. Una vez presentado, el criterio se implementa en el programa CONSHEAR para posteriormente validarlo con pruebas experimentales disponibles en la literatura, concretamente unas vigas de hormigón armado reforzadas con FRP distribuido con diferentes

configuraciones: con la sección completamente envuelta, con forma de U o con los laterales reforzados (Alzate, 2012). Las configuraciones completamente envueltas no son vulnerables a este tipo de fallo, pero para las configuraciones en U o en S, este modo de fallo puede ser crítico.

En este caso, hemos analizado únicamente el desprendimiento prematuro de las vigas de hormigón armado reforzadas con FRP con configuración en U.

Los cortantes de rotura numéricos, son algo superiores a los experimentales. Pero, a pesar de que hay una amplia dispersión debido a los diferentes mecanismos de fallo que actúan, la relación entre los cortantes últimos experimentales y los cortantes últimos numéricos de cada tipo es muy parecida, y por lo tanto, los podemos considerar equivalentes.

Si analizamos la relación cortante-desplazamiento, podemos ver que los resultados numéricos son prácticamente iguales a los resultados experimentales. Pero, hay que destacar su tendencia, especialmente en la zona elástica, que es muy similar. Por otro lado, en la zona plástica, los resultados numéricos distan un poco de los experimentales pero ambos llegan al límite plástico en puntos similares.

En cuanto a las relaciones cortante-deformaciones del acero y del FRP, debido a la suposición que hacemos sobre la creación de las fisuras, las deformaciones en el modelo numérico se empiezan a desarrollar para cortantes superiores que en el caso de las deformaciones experimentales. A pesar de ello, en las deformaciones podemos distinguir las tres tendencias y las deformaciones se representan bien con el modelo numérico, aun siendo sustancialmente superiores.

Finalmente, si analizamos la relación entre las tensiones del FRP obtenidas con el programa experimental y con el modelo numérico, podemos observar claramente las tres tendencias por las que pasa el FRP (el FRP no recibe tensiones, el acero y el FRP soportan las tensiones y el FRP soporta las tensiones) antes de que se produzca su desprendimiento.

Cabe destacar que las mejores predicciones se tienen cuando el refuerzo es continuo, estando más del lado de la seguridad para refuerzo con separación.

Visto esto, vemos que el modelo es capaz de reproducir el comportamiento de las vigas de hormigón armado reforzadas con FRP en U, con buenas representaciones del cortante último, del cortante-desplazamiento, del cortante-deformaciones del FRP y del acero y del cortante-tensiones del FRP. También muestra el desprendimiento prematuro del FRP y la tensión para la que se desprende, que es esencial para poder predecir la carga de rotura de la viga. Ya que el fallo se produce cuando la tensión vertical en el FRP alcanza la tensión máxima que se puede transferir por los mecanismos de contorno. Si no hiciéramos caso a este tipo de fallo, las predicciones obtenidas para las configuraciones en U darían lugar a errores en el cálculo de la capacidad última de la viga.

5.2. FUTURAS INVESTIGACIONES

A partir del trabajo desarrollado hasta ahora entorno al desprendimiento prematuro de los laminados de FRP, existen varias líneas de investigación futura que proponen completar aspectos aún no resueltos.

En primer lugar, sería conveniente realizar un estudio numérico para las vigas ensayadas de Alzate con configuración en U y con 45° de orientación, y comprobar que el programa CONSHEAR estudia correctamente su comportamiento.

En segundo lugar, se debería estudiar más exhaustivamente los mecanismos de rotura que se generan cuando las vigas están reforzadas externamente con FRP a cortante, y así desarrollar un modelo fiable.

Finalmente, sería bueno modelizar más ensayos mediante CONSHEAR, para realizar una validación más profunda del modelo. Para ello, una buena opción sería hacer análisis con el objetivo final de aplicarlos en intervenciones de estructuras críticas a cortante a escala real, y así hacer una valoración más exhaustiva.

6. REFERENCIAS

[1]. Alzate A. (2012):

“Análisis de los modelos de comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con polímeros armados con fibras (FRP). Validación y calibración experimental.”

“01-Vigas 530.xls”

“02-Vigas 300.xls”

“03-Programa de ensayos.xls”

Tesis doctoral, UPM, Departamento de mecánica de los medios continuos y teoría de estructuras, Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción - CSIC, Departamento de construcción [UPM].

[2]. Alzate, A., Arteaga, A., de Diego, A., Cisneros, D. & Perera, R. (2012). “Refuerzo externo a cortante con láminas de CFRP en elementos de hormigón armado.” *Materiales de Construcción*, doi: 10.3989/mc.2012.06611

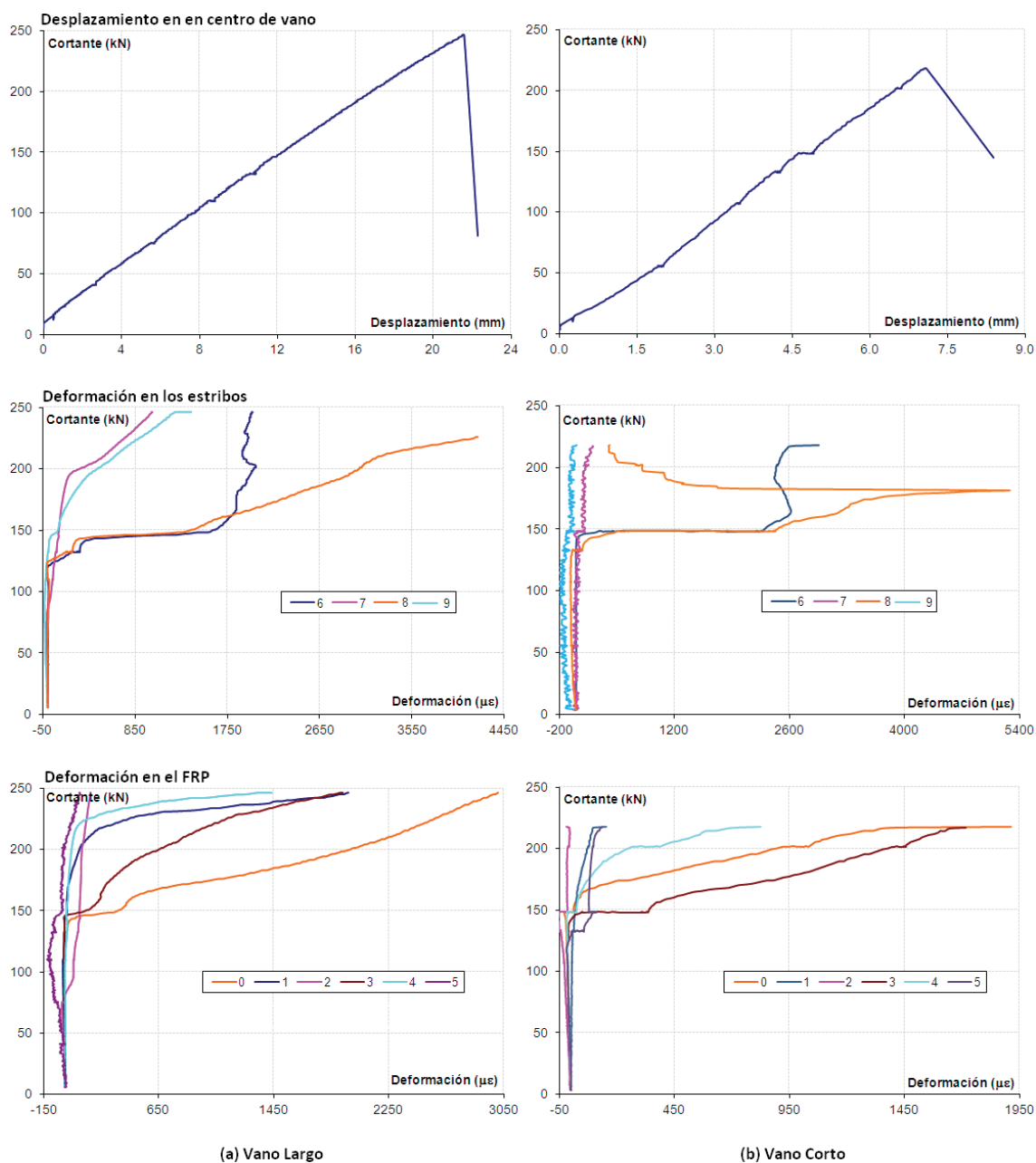
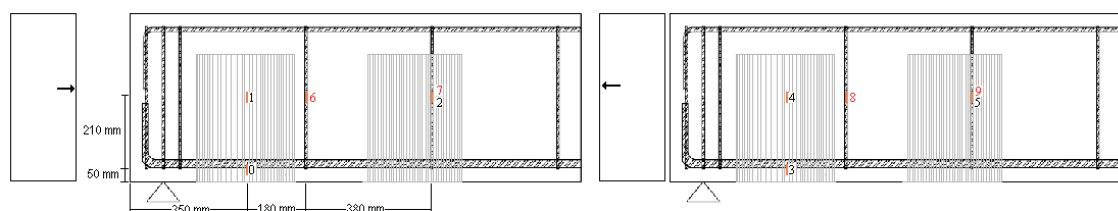
[3]. Brosens, K. (2001). “Anchorage of externally bonded steel plates and CFRP laminates for the strengthening of concrete elements.” *Ph.D. thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.*

- [4]. CEN, AENOR. (2010). "Eurocódigo 2: Cálculo de estructuras de Hormigón" *Parte 1: Reglas generales y reglas para edificios. Código de diseño. Madrid: AENOR, 2010.*
- [5]. EN 1992-1. "Eurocode 2: design of concrete structures."
- [6]. Feldman, D. (1989). "Polymeric building materials." *UK: Elsevier Science Publishers Ltd.*
- [7]. Ferreira, D. (2013). "A model for the nonlinear, time-dependent and strengthening analysis of shear critical frame concrete structures." *Ph. D. thesis, Dept. of Construction Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.*
- [8]. Ferreira, D; Oller, E; Marí, A; Bairán, J. (2013). "Numerical Analysis of Shear Critical RC Beams Strengthened in Shear with FRP Sheets." *Journal of composites for construction, ASCE, Vol. 17 nº 6 pp 1-11.*
- [9]. Ferreira, D; Marí, A; Bairán, J. (2013). "Computer Program CONSHEAR: Nonlinear analysis of concrete structures critical to shear." *Dept. of Construction Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.*
- [10]. Kupfer, H., Hilsdorf, H.K. and Rusch, H. (1969). "Behavior of concrete under biaxial stresses." *J. ACI. 66(8), pp 656-666.*
- [11]. Oller, E; Cobo del Arco, D; Marí, A. (2009). "Interface behavior in Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened beams subjected to transverse loads: Maximum transferred force." *Journal of composites for construction, ASCE, Vol. 13 nº 1 pp 35-44.*
- [12]. Oller, E; Cobo del Arco, D; Marí, A. (2009). "Design Proposal to Avoid Peeling Failure in FRP-strengthened Reinforced Concrete Beams." *Journal of composites for construction, ASCE, Vol. 13 nº 5 pp 384-393.*
- [13]. Oller, E. (2005). "Peeling failure in beams externally strengthened by plated bonding. A design proposal" *Ph. D. thesis, Dept. of Construction Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.*
- [14]. Rodríguez, I. (2014). "Estudio del desprendimiento prematuro del refuerzo a cortante con laminados FRP." *Tesina, Dept. of Construction Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.*
- [15]. Rüsch, H. (1960). "Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete" *J. ACI, vol. 32, no. 1, pp. 1- 28.*
- [16]. Täljsten, B. (1994). "Plate bonding, Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fiber reinforced plastics." *Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering.*

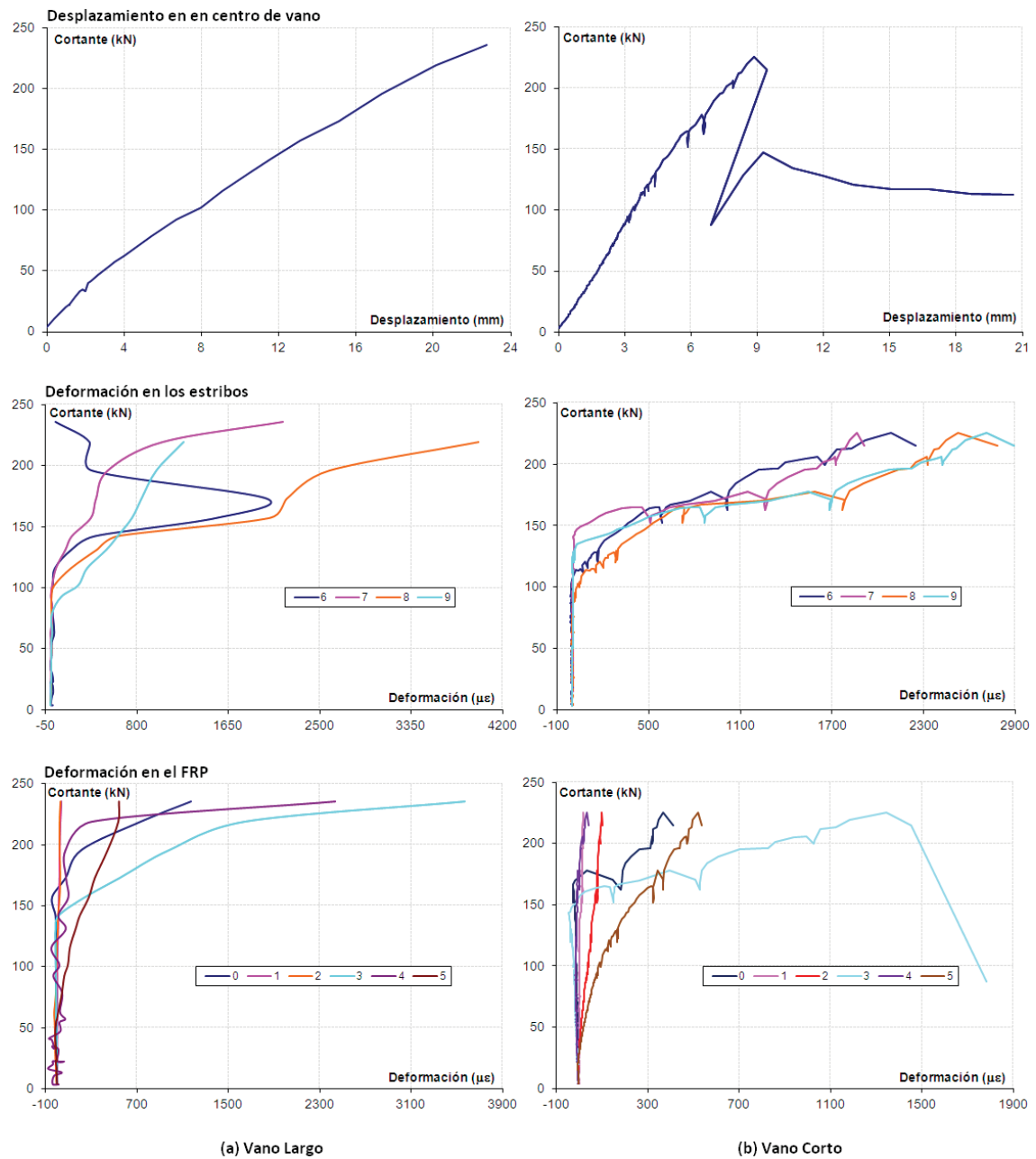
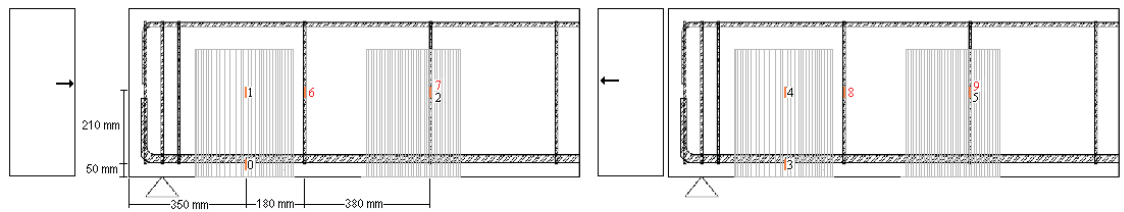
ANEJO 1:

BASES DE DATOS DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL DE ALZATE

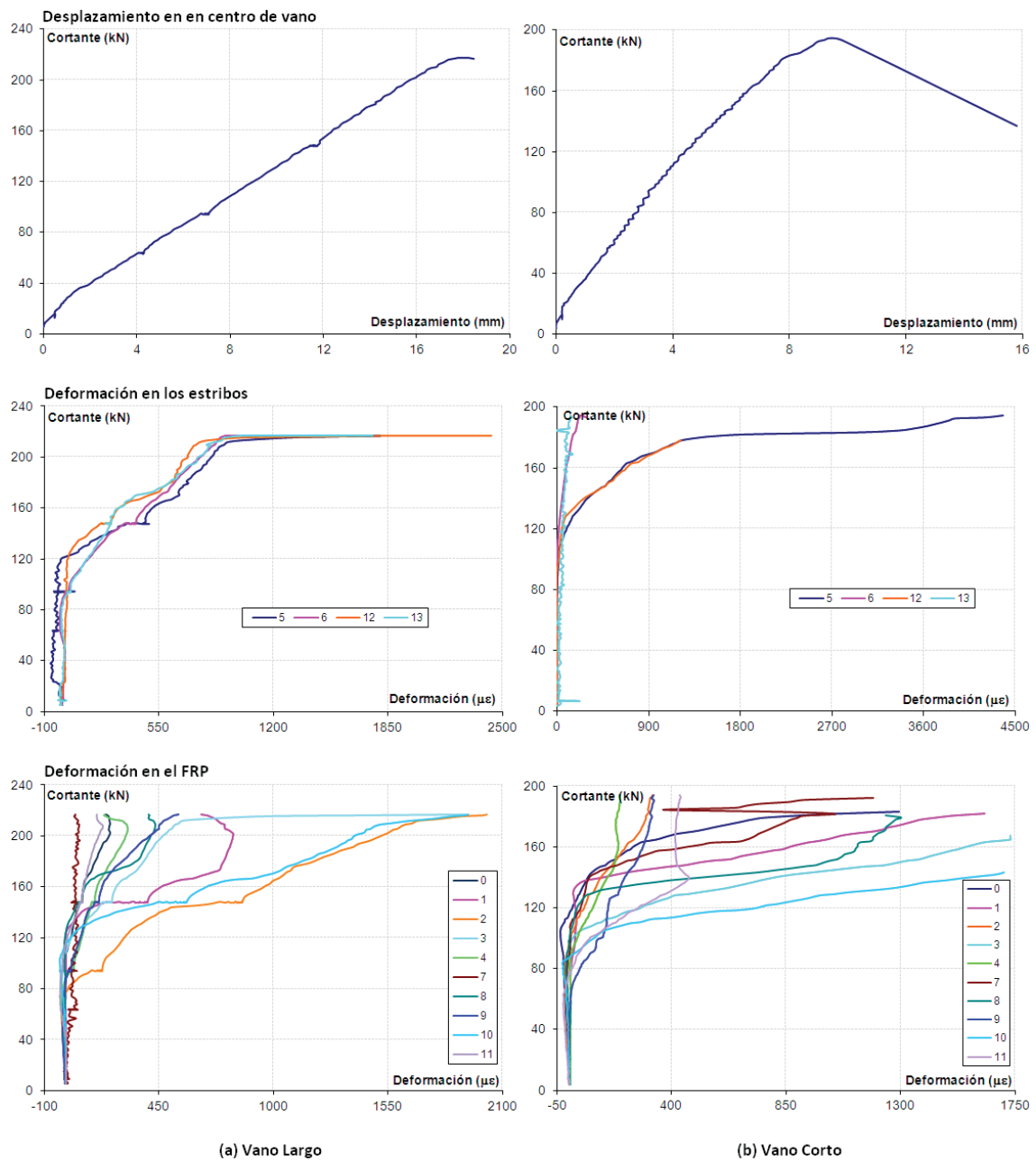
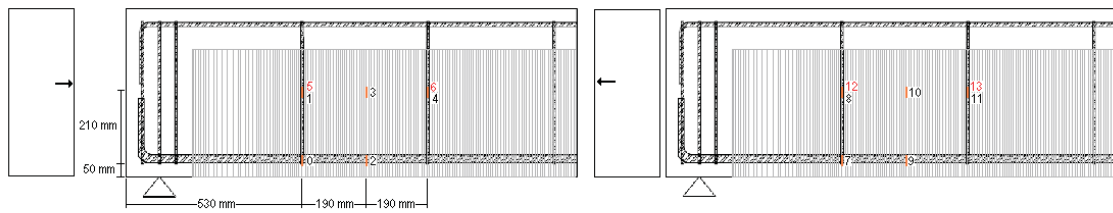
B.2. U90S5-a



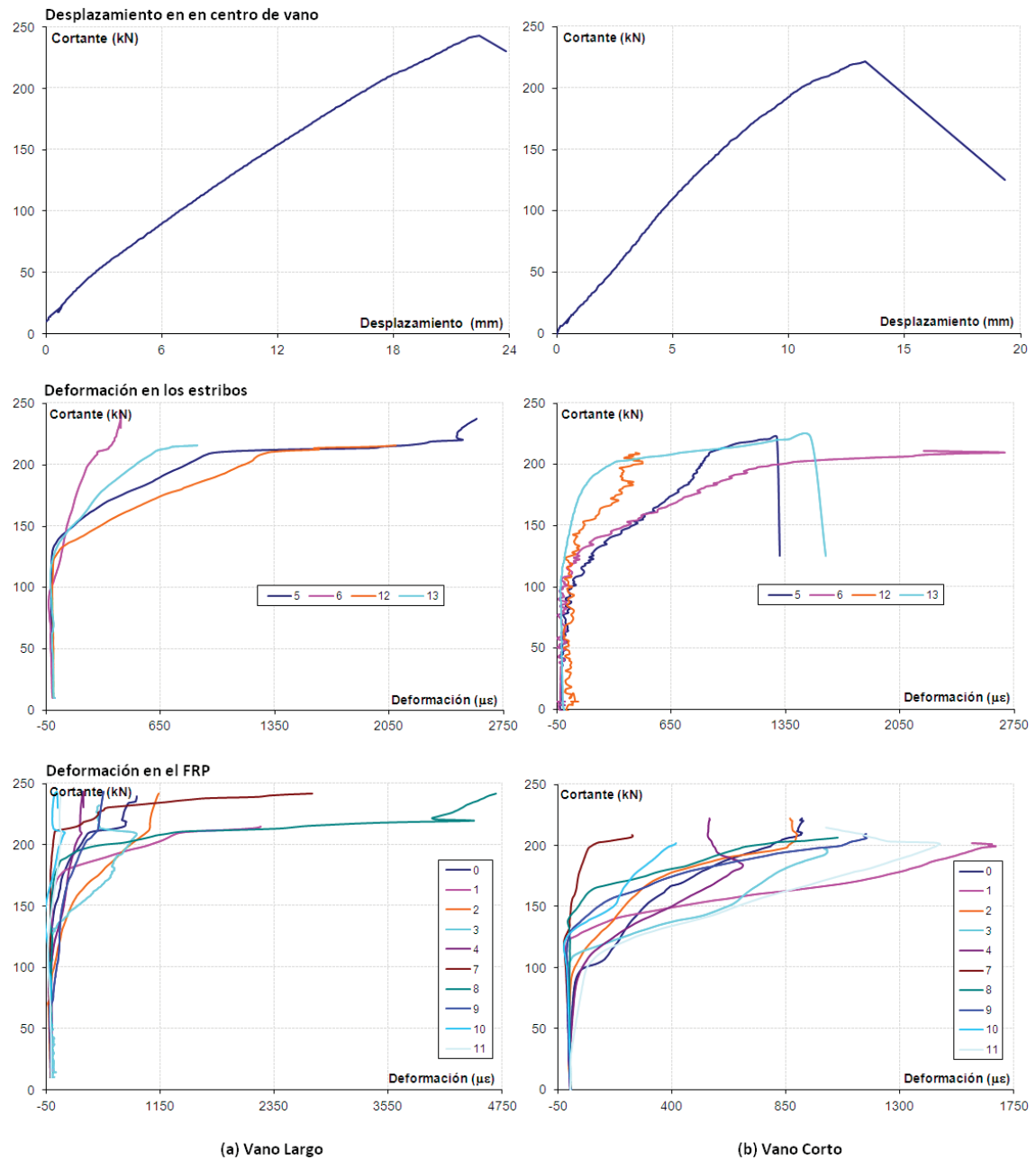
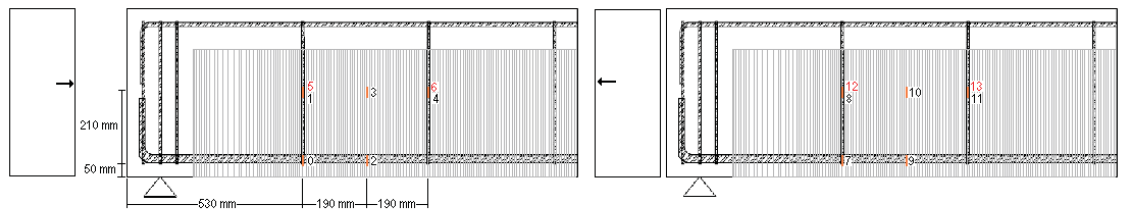
B.3. U90S5-b



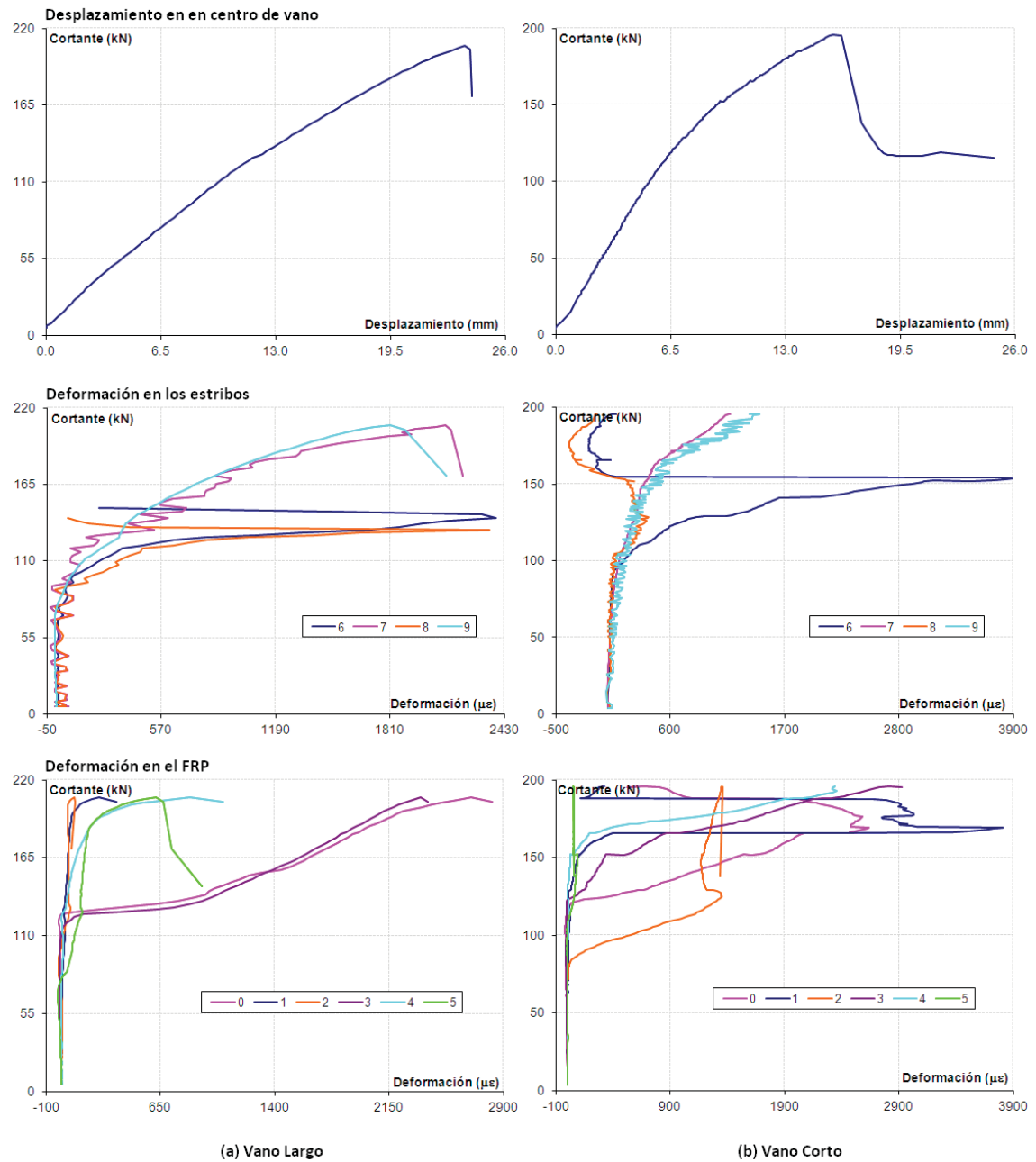
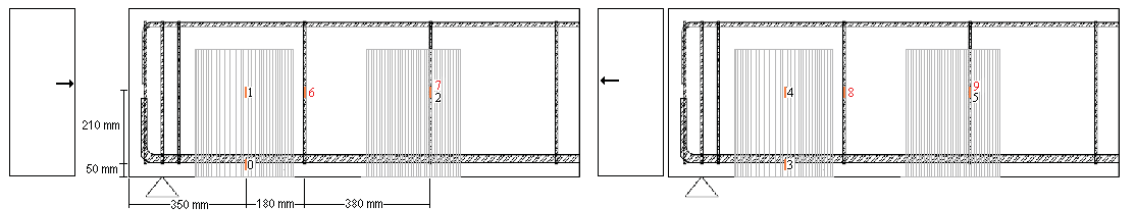
B.4. U90C5-a



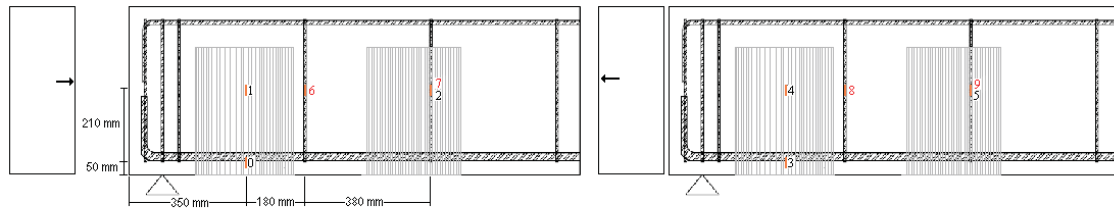
B.5. U90C5-b



B.9. U90S3-a

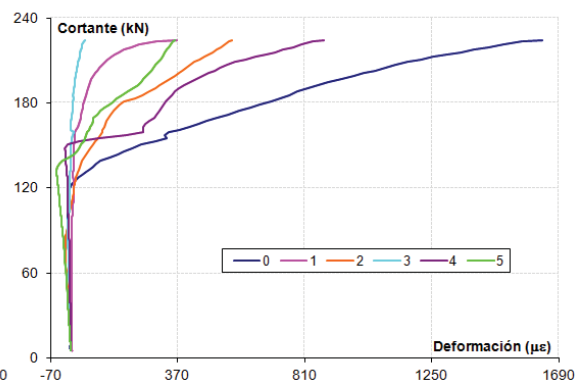
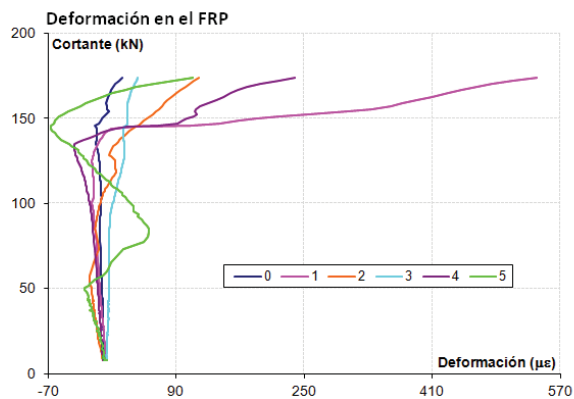
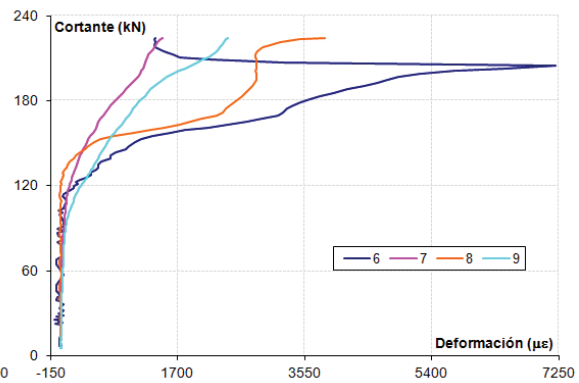
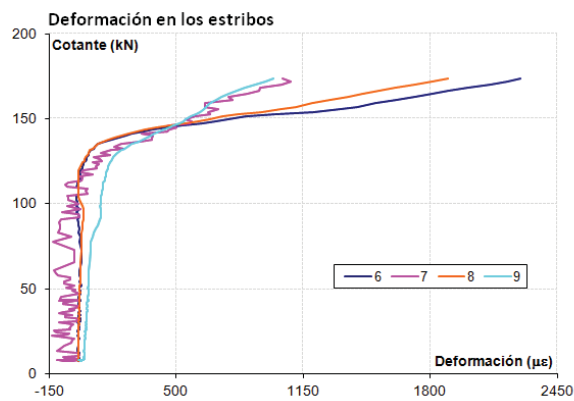
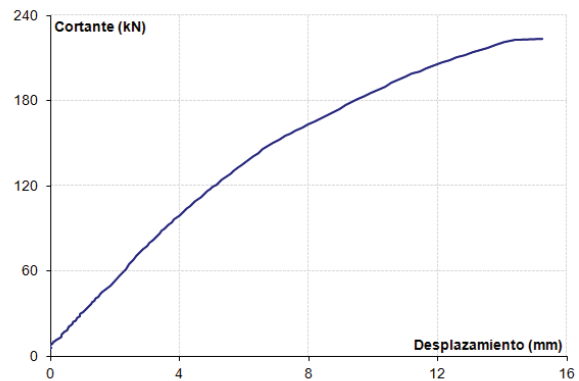


B.10. U90S3-b



Desplazamiento en el centro de vano

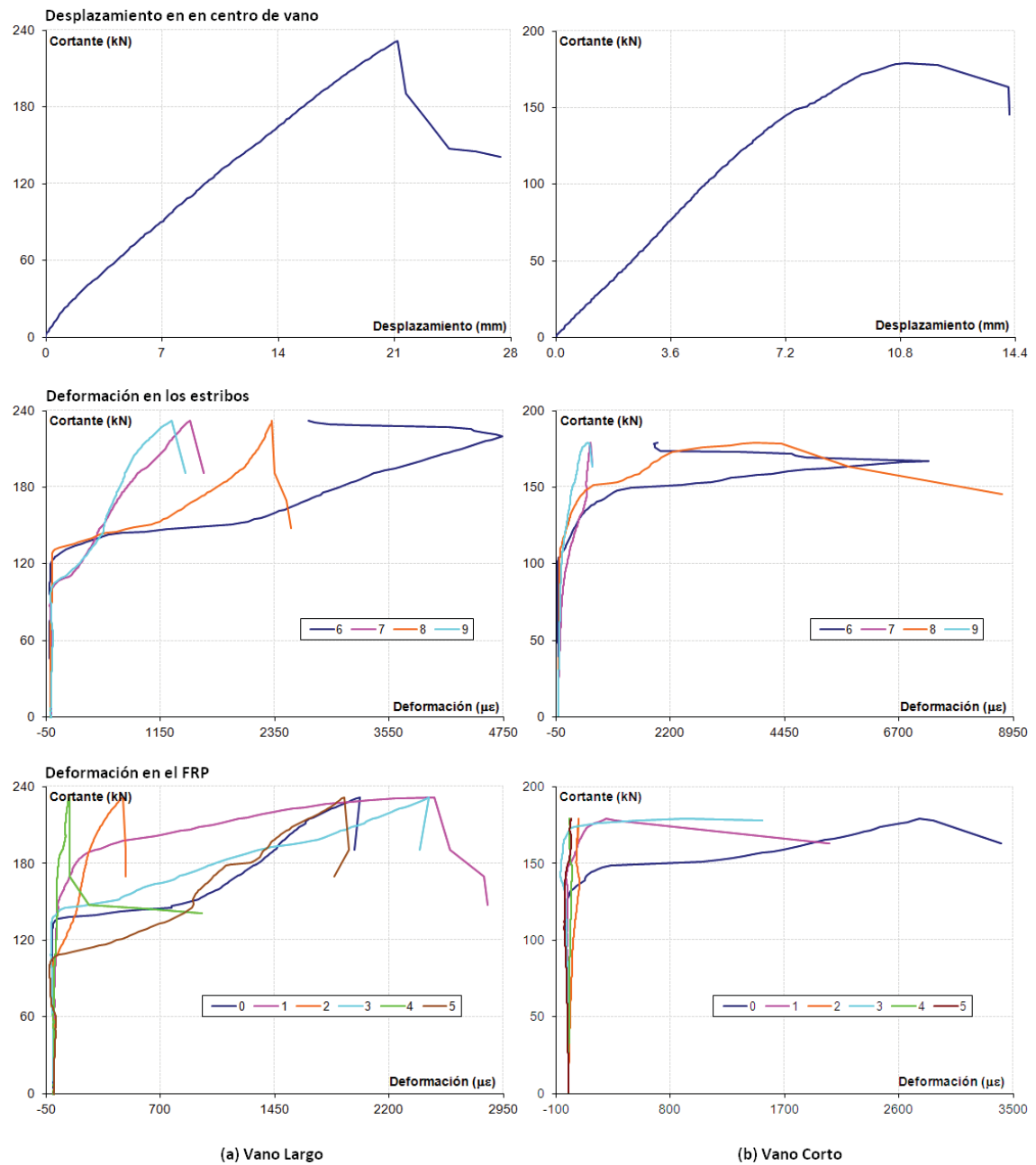
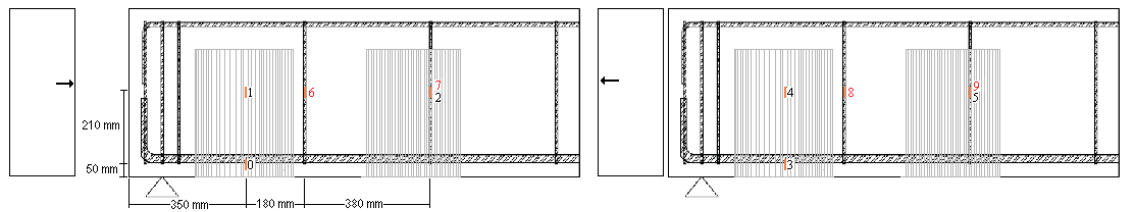
"Datos no registrados por el captador"



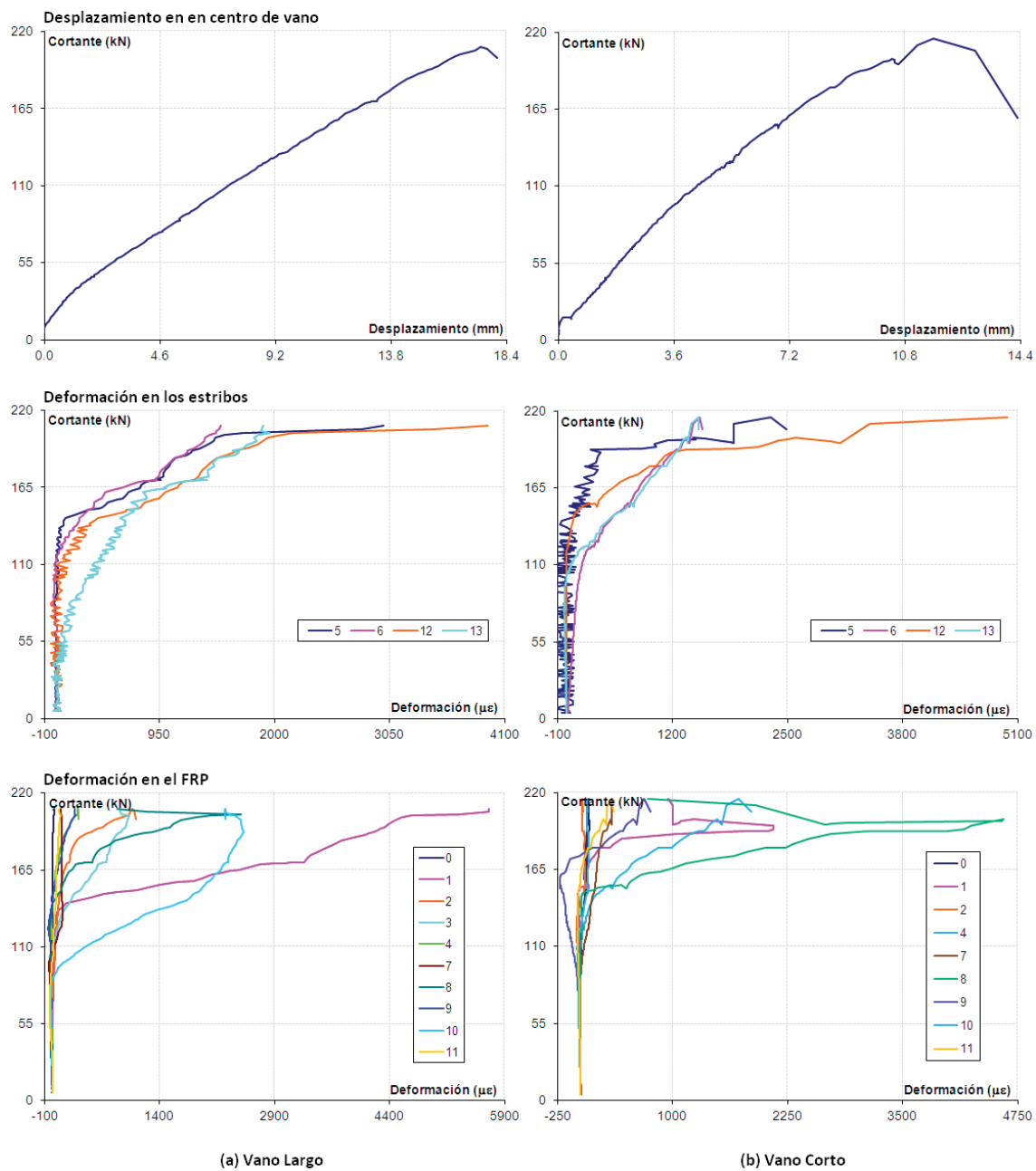
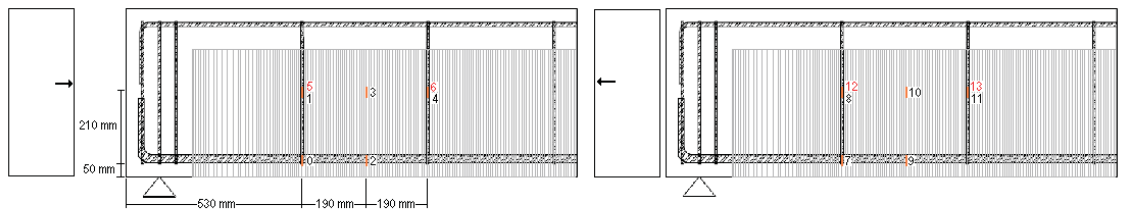
(a) Vano Largo

(b) Vano Corto

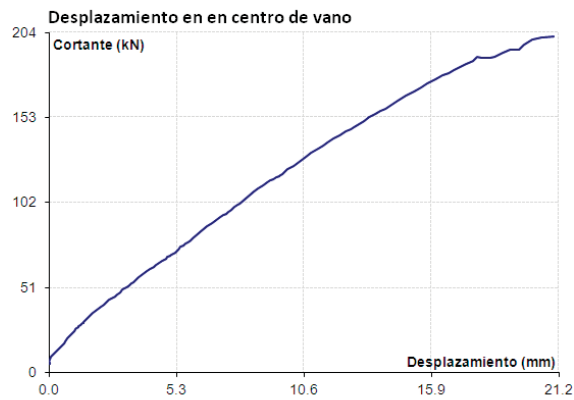
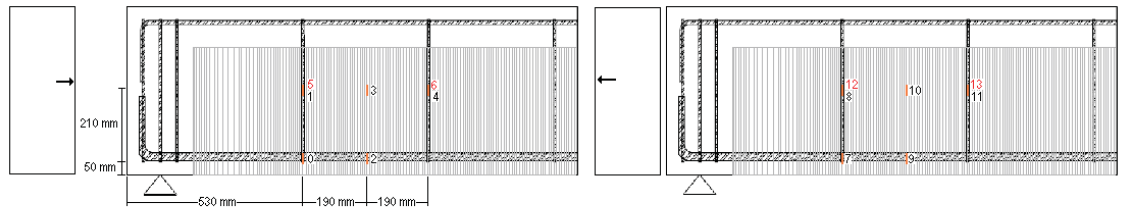
B.11. U90S3-c



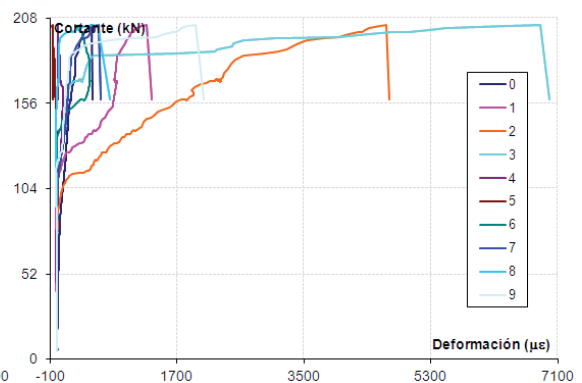
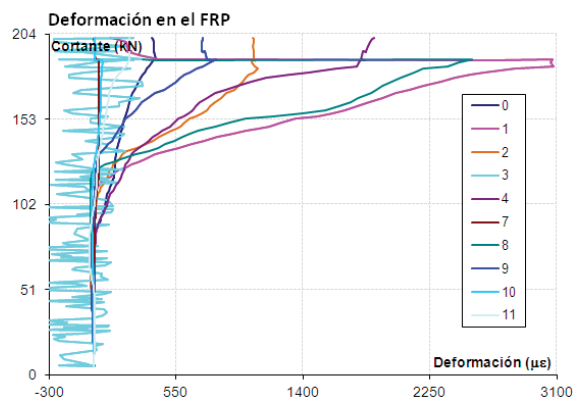
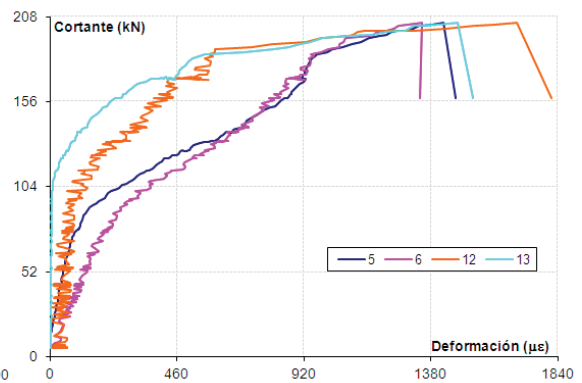
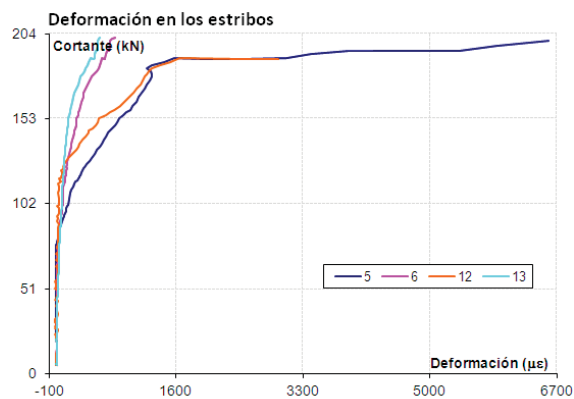
B.12. U90C3-a



B.13. U90C3-b



"Datos no registrados por el captador"



(a) Vano Largo

(b) Vano Corto

ANEJO 2:

ARCHIVOS UTILIZADOS EN LA MODELIZACIÓN NUMÉRICA CON EL
PROGRAMA CONSHEAR

En estos archivos del software Excel se encuentran los datos para sacar las gráficas de los resultados obtenidos con el programa CONSHEAR:

1. U90-C530 (L).xls

Para el caso de FRP con configuración en U continua, para vano largo y con gramaje 530 g/m².

2. U90-C300 (L).xls

Para el caso de FRP con configuración en U continua, para vano largo y con gramaje 300 g/m².

3. U90-S530(L).xls

Para el caso de FRP con configuración en U separada, para vano largo y con gramaje 530 g/m².

4. U90-S300(L).xls

Para el caso de FRP con configuración en U separada, para vano largo y con gramaje 300 g/m².